CH. NORDMANN

Einstein und das Weltall



VERLAG JULIUS HOFFMANN
STUTTGART

MÍG



Zum andenken an lieben Herrn Theo. von W. [illegible]

4/II. 23. Berlin.

Einstein und das Weltall



Phot. A. Groß

Albert Einstein

Einstein und das Weltall

von

Ch. Nordmann
vom Pariser Observatorium



Verlag von Julius Hoffmann
Stuttgart

Ins Deutsche übertragen
von Professor Dr. Paul Sakmann

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft
in Stuttgart

Inhalt

Siebentes Kapitel

Achtes Kapitel

Neuntes Kapitel

Einleitung

Dieses Buch ist kein Roman. Und doch ... Wenn die Liebe, wie Platon versichert, ein Aufschwung zum Unendlichen ist, wo blüht größere Liebe als in jener leidenschaftlichen Wißbegierde, von der wir blindlings getrieben mit klopfendem Herzen an die geheimnisvolle Mauer der Außenwelt anrennen? Hinter ihr, das fühlen wir, geht etwas Erhabenes vor. Was? Auf der Suche danach haben die Menschen den Grund zur Wissenschaft gelegt.

Gegen diese Mauer, die uns die Wirklichkeit verdeckt, ist soeben ein Riesenschlag geführt worden von einem Manne ersten Rangs, Einstein. Ihm danken wir es, wenn durch die geöffnete Bresche ein weniges von dem verborgenen Licht bis zu uns durchsickert und unsere Augen blendet und entzückt.

Einen leichten Widerschein dieses blendenden Lichts möchte ich in mein Buch einfließen lassen, in Worten so klar und so einfach, wie sie mir zu Gebote stehen.

Die Theorien Einsteins haben eine tiefgreifende Umwälzung in der Wissenschaft zur Folge. Dank diesen Lehren wird uns die Welt einfacher, fester verknüpft und einheitlicher erscheinen. Wir werden künftighin tiefer fühlen, daß sie grandios ist, zusammenhängend, durchwaltet von einer unverbrüchlichen Harmonie. Etwas vom Unaussprechlichen wird uns klarer werden.

Die Menschen gehen durchs Weltall wie jene Staubkörnchen, die im feinen Gold eines Sonnenstrahls durch einen Rolladen

durchsickern, einen Augenblick tanzen und dann in die Finsternis zurücksinken. Gibt es eine schönere und edlere Art, das Leben auszufüllen, als sich Augen, Kopf und Herz vollzutrinken mit dem unsterblichen und doch so flüchtigen Strahl? Gibt es tiefere Lust, als das großartige und überraschende Schauspiel des Weltalls zu betrachten und zu verstehen suchen?

In der Wirklichkeit gibt es mehr Wunderbares, mehr Romantik als in unseren armen Träumereien. Im Wissensdurst, in der mystischen Begeisterung, die uns zum tiefen Herzen des Unbekannten drängt, ist mehr Leidenschaft und Innigkeit als in all den Albernheiten, aus denen so viele Literaturen ihre Nahrung ziehen. In diesem Sinne ist es schließlich vielleicht doch unrichtig, wenn ich sagte, dieses Buch sei kein Roman.

Ich will versuchen, wissenschaftlich genau und doch ohne den geheimnisvollen Apparat der Fachwissenschaft, die Umwälzung klarzumachen, die uns Einstein gebracht hat. Ebenso werde ich versuchen, ihre Grenzen zu bestimmen und festzustellen, was wir im großen und ganzen wirklich von der Außenwelt erkennen können, so wie wir sie durch den durchscheinenden Schirm der Wissenschaft sehen.

Es gibt keine Revolution, der nicht bald eine Reaktion folgte nach dem sinusförmigen Rhythmus, in dem der ewige Gang des menschlichen Geistes zu verlaufen scheint. Einstein ist zugleich der Sieyès, der Mirabeau und der Danton der neuen Revolution. Aber schon kennt auch diese ihre fanatischen Marats, die der Wissenschaft zu sagen wagen: Weiter sollst du nicht gehen!

Darum wird schon ein Widerstand spürbar gegen die Ansprüche allzu eifriger Apostel des neuen wissenschaftlichen Evangeliums. In der Akademie der Wissenschaften in Paris ist eben Paul Painlevé mit der ganzen Kraft eines strengen mathema-

tischen Genius aufgestanden und hat sich zwischen Newton, den man niedergeworfen glaubte, und Einstein gestellt.

Am Abschluß meiner Untersuchung werde ich die tiefeindringende Kritik dieses französischen Mathematikers würdigen. Sie wird es mir ermöglichen, am rechten Orte in der Entwicklung unseres Weltbilds die glänzende Einsteinsche Synthese einzureihen, die ich zunächst mit all der Liebe vortragen will, die man zum richtigen Verständnis solcher Dinge braucht.

Mit Einstein hat die Wissenschaft ihre Aufgabe nicht abgeschlossen. Es bleibt nach ihm noch mancher Abgrund, den unser Senkblei nicht ausmißt und in den morgen ein anderer großer Geist mit seiner Klarheit hineinleuchten wird.

Was die verehrungswerte, majestätische Größe der Wissenschaft bildet, ist gerade die Tatsache, daß sie ein ewiges Werden ist. Im düsteren Wald des Geheimnisses ist die Wissenschaft eine Art von Lichtung. Unaufhörlich weitet der Mensch den Kreis, der sie begrenzt. Aber zugleich, ja eben dadurch kommt er an immer zahlreicheren Punkten auch mit der Finsternis des Unbekannten in Berührung. In diesen Wald haben wenige Menschen die funkelnde Axt so tief hineingetragen wie Einstein.

Den niederen Vorurteilen zum Trotz, die uns allenthalben das Leben verbittern, und unter so viel elendem Zufallstand erhebt sich Einsteins Lehrgebäude um so größer. Das Augenblicksinteresse daran gleicht dem sprühenden, leichten Schaum, der eine kurze Zeit das Gold edlen Weines krönt und verhüllt. Wenn der flüchtige Lärm, der heute noch unsere Ohren erfüllt, verstummt sein wird, dann wird Einsteins Lehre aufragen wie ein gediegener Leuchtturm an der Schwelle dieses traurigen und kleinen zwanzigsten Jahrhunderts. Nordmann

I

Die Wandlungen von Raum und Zeit

Beseitigung der mathematischen Schwierigkeiten • Der absolute Raum und die absolute Zeit von Aristoteles bis Newton • Der relative Raum und die relative Zeit von Epikur bis auf Poincaré und Einstein • Die klassische Relativität • Der Widerspruch der Aberration der Sterne und des Versuches von Michelson

»Habt ihr Spinoza gelesen?« rief ehemals der gute La Fontaine. Heute hätte er seinen Freunden zugesetzt mit dem Ruf: »Habt ihr Einstein gelesen?«

Aber für den Zugang zu Spinoza genügt die Kenntnis von einem bißchen Latein, während fürchterliche Ungeheuer vor Einstein Wache halten. Sie treiben sich hinter seltsamen beweglichen Gittern herum, die bald geradlinig, bald krummlinig sind und die man Koordinaten heißt. Ihre Namen sind so haarsträubend wie ihr Aussehen. Sie heißen: kontravariante und kovariante Vektoren, Tensoren, Determinanten, orthogonale Vektoren, Symbole mit drei allgemeinen Indizes usw. usw.

Alle diese Wesen aus den mathematischen Dschungeln verkoppeln sich und spalten sich in einem unheimlichen Durcheinander mittels jener erstaunlichen Chirurgenkunst, die man Integration und Differentiation heißt. Kurz, wenn Einstein ein Schatz ist, so hält ein fürchterliches Gewimmel von mathe-

matischen Kriechtieren den Neugierigen in respektabler Entfernung. Daß auch in ihnen etwas von der geheimnisvollen Schönheit der gotischen Wasserspeier lebt, daran ist gar kein Zweifel. Aber besser ist es doch, sie mit der Waffe des Wortes zu verscheuchen und in die strahlenden Einsteinschen Höhen auf der hellen vornehmen Treppe klarer Sprache hinaufzusteigen.

Alle unsere Begriffe, die ganze Wissenschaft, ja das praktische Leben selbst ruhen auf der Vorstellung, die wir uns von den wechselnden Erscheinungen der Dinge bilden. Unser Geist reiht diese mit Hilfe unserer Sinne vor allem in die Zeit und in den Raum ein. Das sind die beiden Rahmen, in die wir zunächst das Sinnenfällige der äußeren Welt einstellen. Wenn wir einen Brief schreiben, so setzen wir Ort und Datum unten hin. Wenn wir in eine Zeitung blicken, so sehen wir diese Angaben an der Spitze aller Telegramme. Und so ist es überall und immer. Die Zeit und der Raum, die Lagerung der Dinge und ihre zeitliche Fixierung erscheinen so als die beiden Doppelpfeiler aller Erkenntnis, als die zwei Säulen, die das ganze Gebäude der menschlichen Geisteswelt tragen.

Alles, was für uns da ist in der weiten Welt, alles, was wir von ihr wissen und sehen, der ganze in Worten nicht faßbare, verworrene Ablauf der Erscheinungen, er bietet uns umgrenzte Bilder, feste Formen erst, nachdem er die beiden aufeinanderliegenden Filtergewebe passiert hat, die unser Geist einfügt: die Zeit und den Raum.

Die Bedeutung der Arbeiten Einsteins liegt, wie wir zeigen werden, in dem Nachweis, daß unsere Vorstellung von Zeit und Raum einer neuen Überprüfung bedarf. Wenn dem so ist, so muß die ganze Wissenschaft und mit ihr die Psychologie umgearbeitet werden. Das ist der erste Teil des Einsteinschen Werkes.

Aber darauf beschränkt sich die Wirkung seines tiefen Genius nicht. Sonst wäre sie nur verneinender Art. Nachdem er niedergerissen hat, nachdem er unsere Erkenntnis befreite von dem, was man für ihre unerschütterliche Grundlage hielt und was nach ihm doch nur das gebrechliche Gerüst war, das uns die wunderbaren Verhältnisse des Baus verdeckte, da hat er neu aufgebaut. Er hat in das Bauwerk mächtige Fensteröffnungen eingebrochen, die nun unsrem staunenden Blick die darin verborgenen Schätze enthüllen. Mit einem Wort, Einstein hat auf der einen Seite gezeigt, und zwar mit großartiger Schärfe und Tiefe, daß die Grundlage unserer Erkenntnis nicht so ist wie wir dachten und daß sie neu gelegt werden muß mit neuen Bindemitteln. Anderseits hat er auf dieser Grundlage das in seinen Tiefen erschütterte Gebäude neu wieder aufgeführt in kühnen Formen von überwältigender Schönheit und Einheitlichkeit.

Meine Aufgabe ist es nun, diese allgemeinen Sätze so anschaulich und so genau wie möglich im einzelnen auszuführen. Von vornherein aber muß ich einen Punkt von ausschlaggebender Bedeutung betonen: Hätte Einstein sich auf den ersten Teil seines Werkes — in dem eben gegebenen Umriß — beschränkt, auf denjenigen, der unsere klassischen Begriffe von Zeit und Raum erschüttert — er hätte in der Welt des Gedankens nie den Ruhm erlangt, der ihn schon heute umstrahlt.

Das ist sehr wichtig. Denn die meisten von denen, die außerhalb des Kreises der reinen Fachleute über Einstein schrieben, haben vor allem und oft sogar ausschließlich auf die zerstörende Seite seines Eingreifens den Nachdruck gelegt. Nun ist aber von diesem Gesichtspunkt aus Einstein weder der erste noch der einzige. Das Bohrmesser, das andere vor ihm, in erster Linie Henri Poincaré, gehandhabt haben, hat er lediglich noch mehr ge-

schärft, noch tiefer in die Fugen der schlecht gefügten Blöcke der klassischen Wissenschaft eingeführt. Dann aber werde ich versuchen, den großen, unsterblichen Anspruch Einsteins auf die Dankbarkeit der Menschen zu begründen, der darin besteht, daß er über diesem kritischen Werk aus eigener Kraft etwas Großartiges, Neuartiges erbaut hat: Das ist ein Ruhm, in den er sich mit niemand zu teilen hat.

Die ganze Wissenschaft beruht, seit Aristoteles bis auf den heutigen Tag, auf der Hypothese oder richtiger auf den Hypothesen, daß es eine absolute Zeit und einen absoluten Raum gibt. Mit anderen Worten, man hat unseren Begriffen den Gedanken untergelegt, daß ein zeitlicher Zwischenraum und ein räumlicher Zwischenraum zwischen zwei gegebenen Erscheinungen stets dieselben sind, der Beobachter mag sein, wer er will, und die Beobachtungsbedingungen mögen sein, welche sie wollen. Es wäre beispielsweise, solange die klassische Wissenschaft herrschte, nie jemand der Gedanke in den Sinn gekommen, der zeitliche Zwischenraum, nach Sekundenzahlen berechnet, der zwei aufeinanderfolgende Sonnenfinsternisse trennt, könne etwas anderes sein als eine bestimmte Zahl von genau der gleichen Größe für einen Beobachter auf der Erde und für einen Beobachter auf dem Sirius (wobei natürlich die Sekunde für beide als nach demselben Zeitmesser bestimmt gedacht ist). Ebenso hätte sich niemand gedacht, daß der in Metern ausgedrückte Abstand zweier Gegenstände, zum Beispiel der in einem bestimmten Augenblick trigonometrisch gemessene Abstand der Erde von der Sonne nicht derselbe sein könne für einen Beobachter auf der Erde und für einen auf dem Sirius (wobei das Meter natürlich für beide als nach demselben Maßstab bestimmt gedacht ist).

»Es besteht«, sagt Aristoteles,* »eine und dieselbe Zeit, die in zwei Bewegungen auf entsprechende, gleichzeitige Art abläuft; und wenn die beiden Zeiten nicht gleichzeitig wären, so wären sie doch von derselben Art. So gibt es für Bewegungen, die zur gleichen Zeit stattfinden, nur eine und dieselbe Zeit, diese Bewegungen mögen gleich schnell oder nicht gleich schnell verlaufen; und zwar sogar in dem Fall, daß die eine dieser Bewegungen rein örtlicher Art, die andere zugleich eine Veränderung wäre. ... Folglich können die Bewegungen verschiedener Art sein und sich unabhängig voneinander vollziehen; die Zeit ist beiderseits unbedingt die gleiche.« Diese Aristotelische Begriffsbestimmung der Zeit ist nun mehr als zweitausend Jahre alt. Sie vertritt recht klar den Zeitbegriff, wie er bis in die allerletzten Jahre von der klassischen Wissenschaft, insbesondere von der Mechanik Galileis und Newtons angenommen worden ist.

Und doch scheint es, daß im Gegensatz zu Aristoteles schon Epikur die Haltung angedeutet hat, die später Einstein gegenüber Newton einnehmen wird. In der Tat äußert sich Lukrez in seiner Darlegung der Epikureischen Lehre folgendermaßen: »Die Zeit existiert nicht an sich, sondern allein durch die sinnenfälligen Gegenstände, aus denen der Begriff der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft sich ergibt.«**

In der Tat sind Raum und Zeit von der Wissenschaft seit Aristoteles als unveränderliche, feste, starre, absolute gegebene Größen angesehen worden. Newton glaubte einen von selbst einleuchtenden, selbstverständlichen Satz auszusprechen in seiner berühmten Scholie: »Die absolute, wahre, mathematische Zeit

* Aristoteles, Physik, Buch IV, Kapitel XIV.
** Lukrez, De natura rerum, Buch I, Vers 460 ff.

an sich und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand verläuft gleichförmig ihrer eigenen Natur entsprechend ... Der absolute Raum anderseits, seiner eigenen Natur nach unabhängig von jeder Beziehung zu äußeren Gegenständen, bleibt immer unveränderlich und unbeweglich.«

Die gesamte Wissenschaft, die ganze Physik und Mechanik, wie man sie heute noch auf den Gymnasien und den meisten Universitäten vorträgt, beruhen ganz und gar auf diesen Begriffsbestimmungen, den Ideen von einer absoluten Zeit, einem absoluten Raum, die an sich bestehen ohne Beziehung zu einem äußeren Gegenstand, unabhängig, entsprechend ihrer eigenen Natur.

Kurz, wenn ich ein Bild brauchen darf, so gleicht die Zeit der klassischen Wissenschaft einem Strom, der die Erscheinungen trägt wie Schiffe, der aber, auch wenn keine Schiffe da sind, ebenso bewegt dahinfließt. Dementsprechend ist der Raum etwa das Ufer dieses Stromes und ebenso gleichgültig gegen die dahinfahrenden Schiffe.

Trotzdem hätte schon zur Zeit Newtons, ja schon zu Aristoteles' Zeiten ein etwas nachdenklicher Metaphysiker in diesen Begriffsbestimmungen einen offenkundigen Anstoß entdecken können.

Die absolute Zeit, der absolute Raum gehören zu den Dingen an sich, von denen der menschliche Geist von jeher eingesehen hat, daß sie ihm nicht zugänglich sind. Die besonderen raumzeitlichen Bestimmungen, diese numerierten Aufschriften, die wir den Gegenständen der äußeren Welt anheften, wie man es auf den Bahnhöfen mit den Gepäckstücken macht, um sie nicht zu verlieren (nicht immer genügt ja diese Vorsichtsmaßregel), diese Daten werden uns von unseren Sinnen, den mit Werkzeugen bewaffneten oder den unbewaffneten Sinnen, geliefert, und

zwar nur bei Gelegenheit bestimmter Eindrücke. Sollten wir einen Begriff von ihnen haben auch ohne Körper, die mit diesen Daten verknüpft sind oder an die wir vielmehr diese Daten knüpfen? Das zu behaupten, so wie es Aristoteles, Newton, die klassische Wissenschaft behaupten, das bedeutet eine kühne, keineswegs als notwendig begründete Annahme.

Die einzige Zeit, von der wir einen Begriff haben, unabhängig von jedem Gegenstand, ist die von Bergson so lichtvoll zergliederte psychologische Zeit, die aber, außer ihrem Namen, keine Beziehung zur Zeit der Physiker, der Wissenschaft hat.

Henri Poincaré gebührt in Wahrheit das Verdienst, mit größter Schärfe und kühnster Verstandesklarheit den Satz aufgestellt zu haben, daß Zeit und Raum, so wie sie uns gegeben sind, nur relativ sein können.

Hier sind einige Zitate nicht zu umgehen. Sie werden zeigen, daß für die meisten Dinge, die man in der Öffentlichkeit gemeinhin Einstein zuschreibt, in Wahrheit Henri Poincaré das Verdienst gebührt. Dieser Nachweis wird Einsteins Verdienste nicht verringern. Sie liegen anderswo, wie wir zeigen werden.

Hören wir Henri Poincaré, dessen sterbliche Hülle nun schon seit Jahren zerfallen ist, dessen Gedanke aber fortwährend alle denkenden Gehirne beherrscht: »Es ist unmöglich, sich den leeren Raum vorzustellen. Daher kommt die nicht weiter erklärbare Relativität des Raums. Wer vom absoluten Raum spricht, braucht ein sinnloses Wort. Ich bin an einem bestimmten Punkt von Paris, nehmen wir den Pantheonplatz, und sage: Ich werde morgen wieder hierherkommen. Wenn man mich fragt: Meinen Sie, daß Sie wieder an denselben Punkt des Raums zurückkommen? so werde ich zu antworten versucht sein: Ja. Und doch hätte ich unrecht, da von heute auf morgen die Erde weitergerückt

ist und den Pantheonplatz mitgenommen hat, der so mehr als zwei Millionen Kilometer durchlaufen hat. Wollte ich mich in meinem Ausdruck genauer fassen, so würde mir das nichts helfen, da unsere Erdkugel diese zwei Millionen Kilometer in ihrer Bewegung im Verhältnis zur Sonne durchlaufen hat, die ihrerseits weitergerückt ist im Verhältnis zur Milchstraße, die sich ihrerseits ebenfalls bewegt mit einer Geschwindigkeit, die wir nicht kennen können. So daß wir in vollkommener Ungewißheit darüber sind und stets sein werden, um wieviel der Pantheonplatz in einem Tag von der Stelle gerückt ist. Was ich sagen wollte, ist kurz gesagt: Morgen werde ich wieder die Kuppel und den Giebel des Pantheon sehen, und wenn es kein Pantheon gäbe, hätte mein Satz keinen Sinn und der Raum würde verschwinden ...«

Poincaré ergänzt seinen Gedanken folgendermaßen: »Nehmen wir an, daß in einer Nacht alle Dimensionen des Weltalls tausendmal größer werden: die Welt wird sich selbst ähnlich geblieben sein, wenn wir dem Wort Ähnlichkeit denselben Sinn geben, den es im dritten Buch der Geometrie hat. Nur wird das, was ein Meter lang war, jetzt ein Kilometer lang sein, was ein Millimeter maß, wird ein Meter messen. Dieses Bett, in dem ich liege, und mein Körper selbst, werden im selben Verhältnis größer geworden sein. Wenn ich am anderen Morgen aufwache, was werde ich empfinden angesichts einer so erstaunlichen Verwandlung? Nun! Gar nichts werde ich bemerken. Die genauesten Maße sind nicht imstande, mir irgend etwas von dieser ungeheuren Umwälzung zu enthüllen, da die Metermaße, deren ich mich bediene, genau in denselben Maßen sich gewandelt haben wie die Dinge, die ich zu messen suche. In Wahrheit besteht diese Umwälzung nur für die, die auf Grund der Vorstellung denken, der Raum sei absolut. Wenn ich einen Augenblick

gedacht habe wie sie, so geschah es nur, um zu zeigen, daß ihre Anschauung einen Widerspruch in sich schließt.«

Dieser Gedankengang Poincarés kann leicht weitergeführt werden. Würden zum Beispiel alle Gegenstände des Weltalls tausendmal höher und tausendmal schmäler, so wären wir ebenfalls nicht in der Lage, es zu merken; denn wir selbst, unsere Netzhaut und die Metermaße, deren wir uns bedienen, hätten zu gleicher Zeit und im selben Sinn die Form gewechselt. Ja, mehr noch: wenn alle Gegenstände des Weltalls einer durchaus unregelmäßigen räumlichen Formveränderung unterzogen würden, wenn ein unsichtbarer allmächtiger Geist sie irgendwie einer Kautschukmasse gleich zerknetete, so käme uns das nicht zum Bewußtsein. Nichts beweist deutlicher, daß der Raum relativ ist und daß wir den Raum nicht unabhängig von den Gegenständen auffassen können, die wir brauchen, um ihn zu messen. Kein Metermaß, kein Raum.

Poincaré hat seine Schlußfolgerungen in dieser Richtung so weit getrieben, daß er bei dem Satz angelangt ist, selbst die Drehung der Erde um die Sonne sei nur eine bequemere Hypothese als die umgekehrte, darum aber nicht wahrer, sonst würde sie das Dasein eines absoluten Raums in sich schließen.

Man erinnert sich, wie gewisse Draufgänger aus dieser Darlegung Poincarés Kapital schlagen wollten, um die Verurteilung Galileis zu rechtfertigen. Es war ein Schauspiel, zu sehen, wie der berühmte Mathematiker-Philosoph sich anstrengen mußte, um diesen Streich zu parieren. Ja, weiß Gott, man kann nicht leugnen, die Verteidigung überzeugte nicht vollkommen. Man läßt eben dem Agnostizismus nie ganz zukommen, was ihm gebührt.

Poincaré ist also an der Spitze derjenigen, für die der Raum

nichts ist als eine Eigenschaft, die wir den Dingen zuschreiben. Für ihn ist unser Begriff vom Raum, wenn ich mich so ausdrücken darf, nichts als das ererbte Ergebnis der Tastversuche unserer Sinne, mit dem wir die äußere Welt in einem gegebenen Augenblick zu erfassen uns bemühen.

Nach dem Raum die Zeit. Auch in dieser Hinsicht lagen die Einwendungen des Relativismus schon lange in der Luft. Aber Poincaré hat ihnen ihre endgültige Gestalt gegeben. Wir brauchen ihm auf seinen lichtvollen Darlegungen nicht zu folgen: sie sind bekannt genug.

Nur das eine wollen wir festhalten, daß man für die Zeit genau wie für den Raum eine Verengerung oder eine Erweiterung des Maßstabs sich ausdenken kann, wovon wir rein nichts merken würden; was die Unmöglichkeit zu zeigen scheint, daß der Mensch eine absolute Zeit fassen kann.

Würde ein boshaftes Geisterwesen eines Nachts sich den Spaß machen, alle Erscheinungen der Welt tausendmal langsamer zu gestalten, wir wären nicht in der Lage, es bei unserem Erwachen zu bemerken, und die Welt käme uns nicht anders vor. Und trotzdem wäre jede der Stunden, die unsere Uhren schlagen, tausendmal länger als die alten Stunden. Die Menschen würden tausendmal länger leben und wüßten nichts davon, denn ihre Eindrücke würden in eben dem Maß langsamer ablaufen.

Als Lamartine ausrief: »O Zeit, verlangsame deinen Flug!« war das, was er sagte, sicher entzückend und doch vielleicht eine Albernheit. Wenn die Zeit dieser leidenschaftlichen Rüge, diesem Befehl gehorcht hätte — die Dichter zweifeln ja an nichts — so hätten Lamartine und Elvire nichts davon merken und nichts davon genießen können. Der Schiffer, der das Liebespaar auf dem See Le Bourget ruderte, hätte sich für keine einzige Über-

stunde bezahlen lassen; und doch hätten seine Ruder die wohllautreichen Wogen des Sees sehr viel länger geschlagen.

Wenn ich das alles in ein Wort zusammenfassen darf, das weniger gesucht und widersinnig ist, als es zunächst der Fall zu sein scheint, so sage ich: In den Augen der Relativisten sind es die Metermaße, die den Raum schaffen, und die Uhren, die die Zeit schaffen.

Das alles haben Poincaré und andere schon sehr lange vor Einstein behauptet; es ist ein Unrecht gegen die Wahrheit, es ihm zuzuschreiben. Ich weiß ja wohl, man leiht nur den Reichen; aber es ist auch den Reichen gegenüber nicht recht, ihnen das zu leihen, was sie nicht brauchen können und was sie auch nicht nötig haben, um reich zu sein.

Übrigens gibt es einen Punkt, an dem schon Galilei und Newton bei allem ihrem Glauben an das Dasein eines absoluten Raums und einer absoluten Zeit eine gewisse Relativität zugestanden haben. Das ist die von ihnen anerkannte Unmöglichkeit, die gleichförmigen Translationsbewegungen voneinander zu unterscheiden, die Gleichwertigkeit aller dieser Translationen, folglich die Unmöglichkeit für eine absolute Translation den Beweis zu führen.

Das ist das, was man das klassische Relativitätsprinzip heißt.

Eine unerwartete Tatsache hat allen diesen Fragen eine neue Tragweite gegeben und Einstein veranlaßt, das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik in unerwarteter Weise weiterzuführen: nämlich das Ergebnis eines berühmten Versuchs von Michelson, den wir kurz beschreiben müssen.

Man weiß, daß die Lichtstrahlen sich im leeren Raum zwischen den Sternen verbreiten; das ermöglicht uns, die Sterne wahr-

zunehmen. Dieser Umstand hat die Physiker schon lange zu der Annahme geführt, daß diese Strahlen sich in einem unendlich elastischen Mittel fortpflanzen, das ohne Masse und Widerstands-vermögen der Ortsveränderung der materiellen Körper, die es allerseits durchdringt, keinen Widerstand entgegensetzt. Dieses Medium nennen die Gelehrten den Äther. Das Licht verbreitet sich nach Art der Wellen im Wasser, mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 300 000 Kilometer in der Sekunde, die ich zur Abkürzung mit dem Buchstaben V bezeichnen will.

Die Erde kreist um die Sonne in einem wahren Äthermeer mit einer Geschwindigkeit der Ortsveränderung von ungefähr 30 Kilometer in der Sekunde. In dieser Hinsicht kann man von der Achsendrehung der Erde absehen, denn sie verleiht der Erd-oberfläche eine Schnelligkeit im Äther, die geringer als 2 Kilo-meter in der Sekunde ist.

Schon lange hat man sich folgende Frage gestellt: Zieht die Erde in ihrer Kreisbewegung um die Sonne den Äther, den sie berührt, mit sich, so wie ein aus einem Fenster geworfener Schwamm das Wasser mitnimmt, in dem er sich vollgesogen hat? Die Erfahrung oder vielmehr die Experimente (es gibt deren von mancherlei Art, die alle übereinstimmen) haben gezeigt, daß die Frage verneinend beantwortet werden muß.

Das ist zunächst durch astronomische Beobachtungen festgestellt worden. Es gibt in der Astronomie eine wohlbekannte von Bradley entdeckte Erscheinung, die man die Aberration nennt. Sie besteht in folgendem: Wenn man einen Stern mit einem Fernglas beobachtet, so formt sich das Bild des Sterns nicht genau in der Richtung der Visierlinie. Der Grund ist folgender: Während die Lichtstrahlen vom Stern, die in das Fernglas ein-getreten sind, dieses der Länge nach durchlaufen, ist das Fern-

glas ein klein wenig weitergerückt, da es von der Bewegung der Erde mitgenommen wurde. Der Lichtstrahl im Fernglas hat dagegen nicht an dieser Bewegung teilgenommen, was genau die kleine Abweichung ergibt, die man Aberration nennt. Ein Beweis, daß das Medium, in dem sich das Licht fortpflanzt, der Äther, der das Fernglas füllt und die Erde umgibt, an der Bewegung der Erde nicht teilnimmt.

Viele andere Experimente haben ebenso einwandfrei festgestellt, daß der Äther, der den Lichtwellen als Träger dient, von der Erde in ihrer Bewegung nicht mitgenommen wird. Da nun aber die Erde im Äther sich bewegt, da sie in ihm weiterrückt wie ein Schiff in einem unbewegten See (und nicht wie ein von der Strömung eines Flusses getragener Schwimmer), so muß es möglich sein, die Schnelligkeit der Erde mit Beziehung auf den Äther herauszubringen.

Eines der Mittel, das man zu diesem Zweck sich ausdenken kann, ist das folgende. Man weiß, daß die Erde sich von West nach Ost um sich selbst dreht und in derselben Richtung um die Sonne. Folglich führt in der Mitte der Nacht die Umwälzung der Erde um die Sonne sie mit einer Schnelligkeit von ungefähr 30 Kilometer in der Sekunde in der Richtung, in der Berlin von Hannover auf Posen zu rückt (bei Tag ist es umgekehrt: Berlin bewegt sich in der Richtung Posen—Hannover um die Sonne). Setzen wir also voraus, daß um Mitternacht ein Physiker in Hannover ein Lichtsignal aussendet; dann muß ein Physiker in Posen, der die Geschwindigkeit dieses Lichtstrahls mißt, finden, daß er $= V - 30$ Kilometer ist.

Denn in der Tat flieht Posen, infolge der Bewegung der Erde, von diesem Lichtstrahl weg. Da sich dieser im Äther fortpflanzt, in einem Medium, das an der Erdbewegung nicht teilnimmt,

muß der Beobachter von Posen finden, daß der Strahl ihm mit einer Geschwindigkeit zukommt, die geringer ist, als wenn die Erde unbeweglich wäre. Es ist ungefähr wie bei einem Schnellzug, vor dem her ein Beobachter auf einem Fahrrad fliehen wird. Wenn der Schnellzug 30 Meter in der Sekunde zurücklegt und der Radfahrer 3 Meter in der Sekunde, so ist die Geschwindigkeit des Zuges im Verhältnis zum Radfahrer 30 — 3 = 27 Meter in der Sekunde; sie wäre gleich Null bei gleicher Geschwindigkeit des Zuges und des Radfahrers.

Wenn dagegen der Radfahrer dem Zug entgegenfährt, so ist die Geschwindigkeit des Zugs im Verhältnis zu ihm 30 + 3 = 33 Meter in der Sekunde. Wenn dementsprechend der Physiker von Posen um Mitternacht ein Lichtsignal aussendet, das der Physiker von Hannover aufnimmt, so muß dieser finden, daß der Lichtstrahl eine Geschwindigkeit = V + 30 Kilometer besitzt.

Man kann das alles auch noch anders ausdrücken. Nehmen wir an, die Entfernung zwischen dem Beobachter von Posen und dem von Hannover betrage genau 500 Kilometer. Während der Lichtstrahl von Hannover sich nach Posen fortpflanzt, flieht Posen von ihm um eine kleine Strecke. Folglich wird dieser Strahl etwas mehr als 500 Kilometer durchlaufen haben, ehe er zu dem Physiker von Posen kommt.

Nun hat, mit Benutzung eines schönen Gedankens von Fizeau, der amerikanische Physiker Michelson die Längen mit Hilfe der Interferenzstreifen des Lichts sehr genau zu messen vermocht. Jede Veränderung der gemessenen Länge kündigt sich an durch eine Verschiebung einer gewissen Zahl dieser Streifen, die man leicht mit einem Mikroskop beobachten kann.

Denken wir uns nun, daß unsere beiden Physiker, anstatt zwischen Posen und Hannover zu experimentieren, im Bereich

eines Laboratoriums operieren. Denken wir uns, sie messen mittels der Interferenzstreifen den von einem Lichtstrahl, der in diesem Laboratorium erzeugt wurde, durchmessenen Raum, und zwar je nachdem er sich in der Richtung der Bewegung der Erde oder im entgegengesetzten Sinn fortpflanzt. Dann haben wir, zurückgeführt auf seine wesentlichen Elemente und vereinfacht zum Zweck der Klarheit dieser Darlegung, den berühmten Versuch Michelsons. Man sollte auf diese Weise einen Unterschied finden, der leicht meßbar sein müßte mit Benutzung des genauen Apparats.

Das war nun keineswegs der Fall. Aller Erwartung zuwider und zum höchsten Erstaunen der Physiker hat man gefunden, daß der Lichtstrahl sich genau mit derselben Schnelligkeit fortpflanzt, wenn der, der ihn aufnimmt, sich von ihm entfernt mit der Schnelligkeit der Erde und wenn er im Gegenteil sich ihm mit derselben Schnelligkeit nähert. Unausweichliche Folgerung: der Äther nimmt teil an der Bewegung der Erde. Aber eben haben wir gesehen, daß andere nicht weniger genaue Experimente festgestellt haben, daß der Äther an der Bewegung der Erde nicht teilnimmt.

Aus diesem Widerspruch, aus diesem Zusammenstoß zweier unvereinbarer und doch wirklicher Tatsachen, ist die glänzende Synthese Einsteins hervorgegangen, wie der Funke sprüht aus dem Zusammenstoß zweier aneinandergeschlagener Kiesel.

2

Die Wissenschaft in einer Sackgasse

Die wissenschaftliche Wahrheit und die Mathematik • Die Rolle Einsteins genau bestimmt • Der Versuch Michelsons, der gordische Knoten der Wissenschaft • Poincarés Schwanken • Die sonderbare aber notwendige Hypothese von Fitzgerald-Lorentz • Die Zusammenziehung der bewegten Körper • Philosophische und physikalische Schwierigkeiten

Es wäre töricht, in irgendeinen der verborgenen Winkel der neuen Lehren Einsteins ohne Zuhilfenahme des mathematischen Bohrwerkzeugs eindringen zu wollen. Und doch glaube ich, daß man mittels der gewöhnlichen Sprache, das heißt durch Bilder und Gedanken, die in Worte gefaßt werden, eine annähernd richtige Vorstellung von den Dingen geben kann, deren verwickeltes Wesen sich gewöhnlich in dem unendlich feinen und geschmeidigen Spiel analytischer Formeln und Gleichungen entfaltet.

Schließlich ist die Mathematik nie etwas anderes gewesen als eine besondere Sprache, eine Art von Stenographie des Denkens und Schließens. Ihr Zweck ist, die verwickelten Mäanderkrümmungen weitschichtiger Gedankengänge mit jener raschen Kühnheit zu überschreiten, von der die Schwerfälligkeit und Langsamkeit der durch Worte ausgedrückten Syllogismen nichts wissen.

So befremdend es für die klingen mag, die in der Mathematik als solcher eine Erkenntnisquelle schätzen, man wird ihr doch nie etwas anderes entlocken, als was stillschweigend schon in die Daten eingeschlossen war, die man in die Doppelkinnladen der Gleichungen wirft. Man wird mir das platte Bild hoffentlich verzeihen: die mathematischen Schlüsse gleichen ganz jenen Maschinen in Chikago, in die man vorn lebendiges Vieh steckt, um ihnen hinten duftende Fleischwaren zu entnehmen. Von den Zuschauern hätte kein einziger versuchen können oder mögen, das lebende Tier zu sich zu nehmen, während wir es in der Gestalt, wie es sich hinten darbietet, sofort uns einverleiben und verdauen können. Und doch ist das zweite nichts anderes als das erste, nur in der richtigen Weise zerkleinert. Genau das besorgt für uns die Mathematik. Sie entzieht den Daten all ihr gehaltreiches Mark mittels einer wunderbaren Maschinerie. Diese wirkt noch, wo das Räderwerk des in Worten verlaufenden Gedankenganges und die Bandketten der Syllogismen bald innehalten und sich festkeilen müßten.

Muß man daraus schließen, daß die Mathematik keine Wissenschaft im eigentlichen Sinne ist? Oder folgt wenigstens das daraus, daß sie eine Wissenschaft ist, nur soweit sie sich nach der Wirklichkeit richtet und sich von Erfahrungsdaten nährt, da »die Erfahrung ja doch die einzige Quelle der Wahrheit ist« und da die Wissenschaft doch die Erforschung der Wahrheit ist? Ich werde mich wohl hüten, darauf zu antworten, da ich zu denen gehöre, die der Meinung sind, daß alles Wissenschaftsstoff ist. Trotzdem ist es der Mühe wert, die Frage zu stellen, denn es herrscht bei uns vielleicht etwas zu sehr die Neigung, eine rein mathematische Bildung als solche schon als wissenschaftliche Bildung anzusehen. Nichts ist unrichtiger. Die Bildung von Gleichungen ist nur eine

abkürzende Form für die Sprache und das logische Denken. Von sich aus kann sie uns nichts mitteilen über die Außenwelt; nur so weit kann sie uns über sie belehren, als sie sich ihr fügsam anschmiegt. Von der Mathematik vor allem gilt das Wort: Naturae non imperatur nisi parendo.

Sind die Formeln Einsteins, wie gewisse schlecht unterrichtete Leute behauptet haben, nur ein Spiel mit transzendenten Formeln — das Wort zugleich im mathematischen und im philosophischen Sinn verstanden? Wären sie nur ein Schwindel erregender mathematischer Bau, an dem die X ihre Spiralen in verwirrenden Arabesken verschlingen, an dem die Integralen mit dem Schwanenhals ihre Motive im Rokokostil entfalten, so wären sie dem Physiker nicht oder doch kaum interessant, ihm, der die Natur der Dinge beobachtet und untersucht, ehe er sich lehrhaft über sie ausläßt. Sie wären wie alle in sich zusammenhängenden metaphysischen Systeme nur ein mehr oder weniger gefälliges Lehrgebäude, dessen Richtigkeit oder Falschheit man doch nicht beweisen kann.

Die Theorie Einsteins ist etwas ganz anderes, ist viel mehr. Sie gründet sich auf Tatsachen. Nie hat eine philosophische Lehre, nie hat eine rein formale mathematische Konstruktion zur Entdeckung neuer Erscheinungen geführt. Weil sie zu solchen Entdeckungen geführt hat, ist Einsteins Theorie weder das eine noch das andere. Das hebt die wissenschaftliche Theorie von der reinen Spekulation ab und begründet, wie ich zu sagen wage, die Überlegenheit der ersteren.

Wie eine kühn über einen Abgrund gespannte Brücke, so stützt sich die Synthese Einsteins auf der einen Seite auf Erscheinungen der Erfahrung, um auf der entgegengesetzten Seite bei anderen bisher nicht vermuteten Erscheinungen anzulangen, deren Ent-

deckung man ihr verdankt. Zwischen diesen beiden gediegenen Erfahrungspfeilern steht der mathematische Beweisgang wie ein wunderbares Geflecht von tausend Stahlsprossen, die die elegante, durchsichtige Architektur der Brücke umreißen. Das ist er und nichts weiter. Aber das Gefüge der Balken und Sprossen könnte anders sein — die Brücke könnte doch — vielleicht mit etwas weniger anmutiger Leichtigkeit — die Tatsachen verbinden, auf denen sie beiderseits wie auf Strebepfeilern ruht.

Kurz, der mathematische Beweisgang ist in der Physik nur ein Einschub, in einer besonderen Sprache eingefügt zwischen erfahrungsmäßige Voraussetzungen und Schlüsse, die der Zuständigkeit der Erfahrung unterstehen und von ihr zu beglaubigen sind. Nun gibt es keine Sprache, die nicht, so gut es eben geht, in eine andere Sprache übertragen werden könnte. Darum bin ich überzeugt, daß schließlich einmal die mathematischen Schwierigkeiten der Einsteinschen Theorien durch ein Spiel von leichteren und mehr zugänglichen Formeln ersetzt werden müssen. Darum ist es meiner Meinung nach schon jetzt möglich, mit Hilfe der gewöhnlichen Sprache eine vielleicht etwas oberflächliche, aber in den großen Zügen doch richtige Vorstellung von dem großen Einsteinschen Bau zu geben, in dem alle Errungenschaften der Wissenschaft sich wie in ein wunderbares Museum einreihen lassen, nach einer neuen Ordnung und in großartiger Einheitlichkeit. Versuchen wir es!

Man kann den Ursprung und Ausgangspunkt von Einsteins System ganz kurz zusammenfassend so bestimmen: 1. Die Beobachtung der Sterne beweist, daß der Raum zwischen den Planeten nicht leer ist, sondern von einem besonderen Medium besetzt, dem Äther, in dem sich die Lichtstrahlen fortpflanzen. 2. Die Tatsache der Aberration und anderer Erscheinungen scheint zu

beweisen, daß der Äther von der Erde in ihrem Lauf um die Sonne nicht mitgenommen wird. 3. Der Versuch Michelsons scheint dagegen zu beweisen, daß der Äther von der Erde in dieser Bewegung mitgenommen wird.

Dieser Widerspruch zwischen gleich feststehenden Tatsachen hat jahrelang einen Gegenstand der Verzweiflung und des Staunens für die Physiker gebildet. Er war der gordische Knoten der Wissenschaft. Man suchte lange und vergebens, ihn zu entwirren, bis Einstein ihn mit einem einzigen Hieb seines wunderbar scharfen Geistes durchschnitt.

Um zu verstehen, wie das vor sich ging — es handelt sich hier um den springenden Punkt des ganzen Systems — müssen wir etwas auf die genauen Bedingungen des berühmten Versuchs von Michelson zurückkommen.

Wie ich im vorigen Kapitel zeigte, wollte Michelson die Geschwindigkeit der Fortpflanzung eines Lichtstrahls untersuchen, den man im Laboratorium erzeugt entweder in der Richtung von Ost nach West oder von West nach Ost, das heißt in der Richtung, in der die Erde sich bewegt mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 30 Kilometer in der Sekunde in ihrer Bewegung um die Sonne.

In Wirklichkeit aber ist das Experiment von Michelson etwas verwickelter; wir müssen darauf zurückkommen.

Es werden dabei vier Spiegel in gleichen Abständen, je zwei einander gegenüber, im Laboratorium aufgestellt. Zwei dieser einander gegenüberstehenden Spiegel sind in der Richtung Ost-West angebracht, in der Richtung der Bewegung der Erde um die Sonne, die zwei anderen sind in der senkrecht darauf stehenden Richtung, in der Richtung Nord—Süd angebracht. Nun bringt man zwei Lichtstrahlen hervor, die sich entsprechend den

Richtungen der beiden Spiegelpaare fortpflanzen. Der Strahl vom Spiegel Ost aus geht zum Spiegel West, wird von ihm zurückgestrahlt und kommt wieder zum Spiegel Ost zurück. Es wird so eingerichtet, daß dieser Strahl mit dem zusammentrifft, der zwischen den Nord-Süd-Spiegeln hin und her wandert. Er interferiert mit ihm und bringt dabei Interferenzstreifen hervor, die, wie schon erklärt wurde, den genauen Unterschied der von den beiden Strahlen zwischen den Spiegeln durchmessenen Wege feststellen lassen. Würde sich eine Abweichung im Unterschied zwischen den beiden Abständen zeigen, so wäre sofort eine Verschiebung einer gewissen Zahl von Interferenzstreifen wahrnehmbar, woraus sich die Größe jener Abweichung ermessen ließe.

Und nun wird uns ein Vergleich zum Verständnis des Vorgangs verhelfen. Nehmen wir an, daß ein heftiger, gleichmäßiger Ost-West-Wind über Berlin weht und daß ein Flugzeug die Fahrt von Hannover nach Posen und zurück ohne Landung machen will, das heißt gegen den Wind bei der Hinfahrt, mit dem Wind im Rücken bei der Rückfahrt. Hannover ist von Posen 500 Kilometer entfernt. Nehmen wir an, daß zur selben Zeit ein anderes dem ersten durchaus gleiches Flugzeug gleichfalls von Hannover aus eine Hin- und Rückfahrt zwischen dem Parallelkreis von Hannover und einem 500 Kilometer weiter nördlich gelegenen Parallelkreis unternehmen will. So wird dieses zweite Flugzeug auf dem Hin- und Rückweg eine zur Richtung des Windes senkrecht stehende Bahn zu durchmessen haben. Vorausgesetzt, daß diese beiden Flugzeuge zu gleicher Zeit abfahren und im selben Augenblick kehrtmachen — werden sie zu gleicher Zeit zurück sein? wenn nicht, welches von beiden wird seine Doppelstrecke zuerst durchlaufen haben?

Würde kein Wind wehen, so ist klar, daß die zwei Flugzeuge zu gleicher Zeit zurückkehrten, da sie beide 1000 Kilometer mit derselben Geschwindigkeit zurücklegen, einer Geschwindigkeit von — sagen wir einmal — 200 Meter in der Sekunde.

Anders wird es sein, wenn Ost-West-Wind weht, wie ich angenommen habe. Es ist leicht einzusehen, daß unter dieser Voraussetzung das Flugzeug, das von Hannover nach Posen und zurück fliegt, zum Zurücklegen seiner Strecke länger braucht als das andere Flugzeug. Denken wir uns, zur Verdeutlichung, der Wind habe dieselbe Geschwindigkeit wie das Flugzeug (200 Meter in der Sekunde). Das Flugzeug, das senkrecht zum Wind fährt, wird um 500 Kilometer nach Westen abgelenkt, während es selbst 500 Kilometer von Süden nach Norden durchmißt. Es wird also im Wind eine Strecke durchmessen haben, die gleich ist der Diagonale eines Quadrats von 500 Kilometer Seitenlänge. Statt 1000 Kilometer zu durchmessen, wird es im Wind tatsächlich 1400 durchmessen haben.

Dagegen wird das Flugzeug, das von Hannover gegen Osten abfliegt, nie in Posen anlangen, da es in jeder Sekunde gegen Westen abgetrieben wird, und zwar um eine Strecke, die der gleich ist, die es auf seinem Weg nach Osten zurücklegen würde. Es wird auf der Stelle bleiben. Es müßte also im Wind eine unendliche Distanz zurücklegen, um seine Fahrt zu vollenden.

Hätte ich, statt dem Wind eine Geschwindigkeit gleich der des Flugzeugs beizulegen (ein Grenzfall, der zur Verdeutlichung der Darlegung gewählt war), ihm eine geringere Geschwindigkeit beigelegt, so würde man gleicherweise finden, und zwar in sehr einfacher Rechnung, daß das Nord-Süd-Flugzeug zur Ausführung seiner Hin- und Rückfahrt im Wind einen weniger großen Raum durchmißt als das Ost-West-Flugzeug.

Ersetzen wir unsere Flugzeuge durch Lichtstrahlen und den Wind durch den Äther, so haben wir fast genau die Bedingungen des Versuchs von Michelson. Ein Ätherstrom, ein Ätherwind (wir haben ja den Äther schon früher als unbeweglich erkannt mit Bezug auf die Ortsveränderung der Erde) geht vom einen zum anderen unserer beiden Ost-West-Spiegel. Also muß der Lichtstrahl, der den Hin- und Rückweg zwischen diesen beiden Spiegeln durchläuft, im Äther einen längeren Weg durchmessen als der Strahl, der den Hin- und Rückweg macht zwischen den Nord-Süd-Spiegeln. Wie soll man diesen sicher sehr schwachen Unterschied zur Anschauung bringen, da die Erde eine unendlich geringe Geschwindigkeit hat im Vergleich mit der des Lichts, nämlich eine zehntausendmal geringere?

Es gibt dafür ein sehr einfaches Mittel, eines jener geistreichen Auskunftsmittel, wie sie so beliebt sind bei unseren scharfsinnigen Physikern, eine jener Differentialmethoden, deren Eleganz und Sauberkeit uns alle Sicherheit geben.

Nehmen wir an, meine vier Spiegel seien aufgeleimt und dicht anliegend befestigt auf einer Platte, die ungefähr den numerierten Drehkreuzen unserer Marktlotterien gleicht. Nehmen wir an, man könne diese Platte nach Belieben drehen, ohne Stoß und ohne Verbiegung, was leicht ist, wenn man sie auf einem Quecksilberbad schwimmen läßt. Ich beobachte mit der Lupe die unbeweglichen Interferenzstreifen, welche den Unterschied der von meinen Nord-Süd- und Ost-West-Strahlen durchlaufenen Wege bezeichnen. Ohne die Streifen aus dem Auge zu verlieren, lasse ich meine Platte eine Wendung von einem Viertelskreis machen. Diese Drehung bewirkt, daß die Ost-West-Spiegel Nord-Süd-Spiegel werden und umgekehrt. Die vom Lichtstrahl Nord—Süd durchlaufene Doppelstrecke ist nun

Ost—West geworden, hat sich also plötzlich verlängert. Die Doppelstrecke des Ost-West-Strahls ist dagegen Nord—Süd geworden, hat sich also plötzlich verkürzt. Die Interferenzstreifen, die den Längenunterschied der beiden Strecken anzeigen, der sich plötzlich um vieles geändert hat, müßten notwendig eine Verschiebung erfahren haben, und zwar in hohem Maß, wie die Berechnung zeigt.

Nun gut! Durchaus nicht. Man kann eine völlige Bewegungslosigkeit der Streifen feststellen. Sie haben sich ebensowenig von der Stelle gerührt, als wenn sie Klötze wären. Das ist höchst befremdend, man möchte sagen empörend. Ist doch die Genauigkeit des Apparats so groß, daß, wenn die Erde im Äther nur mit der Geschwindigkeit von 3 Kilometer in der Sekunde vorrückte (und das ist zehnmal weniger als ihre wirkliche Geschwindigkeit), die Verschiebung der Streifen noch genügend wäre, um diese Geschwindigkeit anzuzeigen.

Als das negative Ergebnis dieses Experiments bekannt wurde, ergriff die Physiker fast eine Bestürzung. Da der Äther — das war doch durch Beobachtung erwiesen — von der Erde nicht fortgerissen wurde, wie war es möglich, daß er sich verhielt, wie wenn er an ihrer Bewegung teilgenommen hätte? Ein verzweifeltes Rätsel, über das sich manche ehrwürdige alte Herren die Köpfe zerbrachen.

Man mußte um jeden Preis aus diesem unerklärlichen Widerspruch herauskommen; man mußte sich rächen für diese respektswidrige lange Nase, mit der die Tatsachen die sichersten Voraussagen der Berechnung bedachten. Das tat man. Wie? Nun nach dem in solchen Fällen üblichen Verfahren, durch Ergänzungshypothesen. Die Hypothesen sind in der Wissenschaft eine Art

von Mörtel, der, schmiegsam wie er ist und an der freien Luft schnell verhärtend, wohl geeignet ist, einerseits die getrennten Blöcke eines Baus aneinanderzufügen, anderseits ein Füllsel abzugeben, das der oberflächliche Beschauer schon andern Tags für guten Werkstein hält. Und weil die Hypothesen in der Wissenschaft etwas Derartiges sind, gelten als die besten wissenschaftlichen Theorien diejenigen, deren Gefüge am wenigsten der Hypothesen bedarf.

Ich hätte aber eigentlich bei diesem Anlaß das Wort gar nicht in der Mehrzahl brauchen sollen; denn es ergab sich schließlich, daß eine einzige Hypothese, unter Ausschluß aller anderen, eine genügende Erklärung für das negative Ergebnis des Michelsonschen Versuchs darbot. Das ist im übrigen etwas Seltenes und Beachtenswertes; denn im allgemeinen schießen Hypothesen pilzartig hervor in jedem nur ein wenig dunkeln Winkel der Wissenschaft, und man stößt sofort auf deren zwanzig verschiedenster Art, wenn es gilt, auch nur die geringste Unklarheit zu klären.

Diese einzige Hypothese, welche die Physiker aus der Verlegenheit zu ziehen schien, in welche sie Michelson gestürzt hatte, wurde zunächst von dem irischen Gelehrten Fitzgerald ersonnen; dann wurde sie in fruchtbarer Weise weitergeführt von dem berühmten Holländer Lorentz, einem der wunderbarsten Köpfe unserer Zeit, ohne den es ebensowenig einen Einstein gegeben hätte als einen Kepler ohne Kopernikus und ohne Tycho Brahe.

Die ebenso einfache wie merkwürdige Hypothese Fitzgerald-Lorentz besteht in folgendem. Vorher aber drängt sich eine wichtige Bemerkung auf. Viele treffliche Köpfe haben — übrigens erst nachträglich — behauptet, das Ergebnis des Versuchs von Michelson habe nur negativ ausfallen können — a priori. In

der Tat — so ungefähr war ihr Gedankengang — will das klassische Relativitätsprinzip, dasjenige, das schon Galilei und Newton kannten, daß es einem Beobachter, der an der gleichförmigen Fortbewegung eines Fahrzeugs teilnimmt, unmöglich ist, durch Tatsachen, die er von dem Fahrzeug aus beobachtet, die Bewegungen des Fahrzeugs festzustellen. Darauf beruht es auch, daß es den Passagieren zweier sich kreuzender Schiffe oder Züge unmöglich ist, zu erkennen, welcher von beiden sich bewegt und welcher von beiden sich rascher bewegt. Alles, was sie erkennen können, ist die Schnelligkeit des einen der beiden Züge (oder Schiffe) mit Bezug auf den anderen. Man kann nur relative Geschwindigkeiten erkennen.*

Nun, so sagten die trefflichen Köpfe, von denen ich vorhin redete, wenn der Versuch Michelsons ein positives Ergebnis gehabt hätte, so hätte er uns über die absolute Geschwindigkeit der Erde im Raum aufgeklärt, dieses Ergebnis wäre im Widerspruch mit dem Relativitätsprinzip der klassischen Philosophie und Mechanik, das eine Wahrheit von unmittelbarer Gewißheit ist. Also konnte es nur negativ sein.

Hier liegt eine Zweideutigkeit vor und, wenn ich mich so ausdrücken darf, ein Denkfehler, dem, wie es scheint, gewisse bedeutende Physiker zum Opfer gefallen sind, namentlich auch Professor Eddington, der im übrigen der einsichtigste unter den englischen Einsteinianern ist. Von ihm wurden die Beobachtungen der Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919 ins Werk gesetzt, die, wie wir sehen werden, die verblüffendste Bestätigung der Folgerungen Einsteins ergeben haben.

Zunächst einmal: Wenn der Versuch Michelsons ein positives

* Voraussetzung dabei ist natürlich, daß das Schiff nicht schlingert und stampft und daß der Zug nicht schüttert.

Ergebnis gehabt hätte, so wäre das, was er festgestellt hätte, die Geschwindigkeit der Erde im Verhältnis zum Äther. Damit diese Geschwindigkeit eine absolute Geschwindigkeit wäre, müßte der Äther identisch mit dem Raum sein. Nun ist nichts weniger sicher als diese Identität, was daraus hervorgeht, daß man sich ganz wohl zwischen zwei Gestirnen einen Raum, sagen wir lieber ein Dazwischen vorstellen kann, in dem auch kein Äther ist, und wodurch kein Licht und keine der bekannten Energieformen sich fortpflanzen könnte.

Wenn Eddington sagt, es stehe fest und sei vernunftgemäß, es sei gegeben mit den Grundgesetzen der Natur, daß man keine Bewegung der Dinge im Verhältnis zum Äther entdecken könne, und das sei sicher, selbst wenn die experimentellen Beweise unzulänglich wären, so behauptet er etwas, das unmittelbar gewiß nur dann wäre, wenn die Identität des Raums mit dem Äther selbst unmittelbar gewiß wäre. Nun ist das keineswegs der Fall. Wenn der Versuch Michelsons ein positives Ergebnis gehabt hätte, wenn man eine Geschwindigkeit der Erde entdeckt hätte, wäre das eine Geschwindigkeit gewesen mit Bezug auf einen absolut festen Ruhepunkt? Durchaus nicht. Es kann sein, ja es wäre recht wohl möglich, daß die Gestirnwelt, die wir kennen, mit ihren Hunderttausenden von Milchstraßen, zu deren Durchmessung das Licht Millionen von Jahren braucht, es kann sein, daß alles das der Inhalt einer Ätherblase wäre, die in einem Abgrund dahinrollt, der von Äther frei ist, aber da und dort besät mit anderen Welten, anderen riesenhaften Äthertropfen, von denen uns kein einziger Lichtstrahl je zukommen wird. Zum mindesten kann man sich das alles widerspruchslos so vorstellen. Wenn nun der Äther die Eigenschaften haben soll, die ihm die klassische Physik zuschreibt, und wenn eine Bewegung der Erde

im Verhältnis zu ihm hätte aufgedeckt werden können, so hätte man damit nicht eine absolute Bewegung erkannt, sondern allerhöchstens eine Bewegung im Verhältnis zum Schwerpunkt unseres eigenen Weltalls, einen festen Richtungspunkt, dessen Verhältnis zu einem anderen absolut unbeweglichen nicht festzustellen wäre. Das klassische Relativitätsprinzip wäre ganz unberührt davon geblieben.

Das Ergebnis des Michelsonschen Versuchs konnte also ebensowohl positiv wie negativ sein, ohne daß es dem klassischen Relativismus zunahetrat. Nun hat es sich tatsächlich als negativ erwiesen, und damit fertig: die Erfahrung hat gesprochen; sie allein konnte sprechen.

Diese feineren Unterschiede sind Poincaré nicht entgangen, der ausdrücklich sagte: »Unter wahrer Geschwindigkeit der Erde verstehe ich nicht ihre absolute Geschwindigkeit, was sinnlos ist, sondern ihre Geschwindigkeit im Verhältnis zum Äther.« Das mögliche Vorhandensein einer auffindbaren Geschwindigkeit im Verhältnis zum Äther erschien ihm also keineswegs als ein Widersinn, ihm, der geschrieben hatte: wer von einem absoluten Raum redet, braucht ein sinnloses Wort.

Es ist bemerkenswert, daß bei alledem der Gedankengang Poincarés ein gewisses Zögern verrät. Bei Gelegenheit von Experimenten, die Ähnlichkeit hatten mit denen Michelsons, rief er: »Ich weiß, man wird sagen, man messe nicht die absolute Geschwindigkeit, sondern die Geschwindigkeit im Verhältnis zum Äther. Wie unbefriedigend ist das doch! Sieht man nicht, daß man dem so gefaßten Prinzip nichts mehr entnehmen kann?« Woraus hervorgeht, daß Poincaré gleichsam wider Willen und obwohl er es nicht Wort haben wollte, doch geneigt war, die Unterscheidung des Äthers und des Raums »unbefriedigend« zu finden.

Ich gestehe, daß mir der Gedankengang Poincarés ebenfalls nicht ganz befriedigend oder doch ganz einleuchtend scheinen will.

Die Natur, hat Fresnel gesagt, kümmert sich nicht um die Schwierigkeiten der Analyse. Ich denke, sie kümmert sich auch nicht um die philosophischen oder rein physikalischen Schwierigkeiten.

Die Meinung, eine Auffassung der Erscheinungen sei um so mehr der Wirklichkeit entsprechend, je »befriedigender« sie sei, je mehr sie sich den Schwächen unseres Geistes anpaßt, ist doch wohl eine nicht ganz einwandfreie Denkweise. Sonst müßte man wohl oder übel auf den Gedanken kommen, das Weltall sei notwendig den Denkformen unseres Geistes angepaßt, es sei so eingerichtet, um uns so wenig als möglich Verlegenheiten zu bereiten. Das wäre auf Umwegen eine seltsame Rückwendung zu der anmaßlichen Einbildung anthropozentrischer Zweckvorstellungen. Die Tatsache, daß die Wagen nicht durchfahren können und daß die Fußgänger umkehren müssen, beweist nicht, daß es keine Sackgassen in unseren Städten gibt. Vielleicht, ja wahrscheinlich gibt es auch Sackgassen in dem wissenschaftlich betrachteten Weltall.

Gewiß kann man mir antworten: Nicht das Weltall ist unserem Geist angepaßt, sondern im Gegenteil unser Geist dem Weltall infolge der notwendigen Entwicklung, die aus der wechselseitigen Reibung der beiden Größen entsteht. Unser Geist muß sich in immer besserer Anpassung an das Weltall entwickeln, so daß sich das Fermatsche Prinzip der geringsten Kraft — vielleicht das tiefste Prinzip der physikalischen, biologischen und seelischen Welt — auswirkt. Dann sind die einfachsten und den geringsten Aufwand benötigenden Auffassungen diejenigen, die der Wirklichkeit am meisten angemessen sind.

Ja, aber womit beweist man, daß unsere begriffliche Entwicklung abgeschlossen und vollendet ist, besonders wenn es sich um Erscheinungen handelt, für die unser Organismus keine Empfindlichkeit hat?

Die Erfahrung allein hat bewiesen und war imstande zu beweisen, daß man die Geschwindigkeit eines Gegenstandes im Verhältnis zum Äther nicht messen kann.

Schließlich — da es offenbar in der Natur der Dinge liegt, daß wir keine absolute Bewegung ermitteln können — haben wir die Geschwindigkeit der Erde im Verhältnis zum Äther doch wohl deswegen nicht ermitteln können, weil diese Geschwindigkeit eine absolute Geschwindigkeit bedeutet? Vielleicht; nur ist das nicht zu beweisen. Wenn ja — nur ist es nicht sicher, daß wir ja sagen müssen —, so ist es schließlich die Erfahrung, die einzige Quelle der Wahrheit, die uns so mittelbar darauf hinweist, daß der Äther in Wirklichkeit mit dem Raum identisch ist. In diesem Fall hört ein ätherloser Raum, ein Raum, in dem Ätherblasen rollen würden, auf, faßbar zu sein, und es besteht nichts als eine einzige Äthermasse, in der die Gestirne schwimmen. Mit einem Wort, das negative Ergebnis des Michelsonschen Experiments konnte zwar nicht a priori aus der fragwürdigen Identität des absoluten Raums mit dem Äther geschlossen werden. Aber dieses negative Ergebnis erlaubt nicht, a posteriori diese Identität zu beseitigen.

Es ist wichtig, daß wir jetzt auf besagten Hammel zurückkommen, ich meine auf die Hypothese Fitzgerald-Lorentz, welche das Ergebnis des Michelsonschen Experiments erklärt und die gewissermaßen das Sprungbrett für Einstein war. Diese Hypothese ist folgende: Ergebnis des Versuchs war: Wenn der Hin- und Her-

weg eines Lichtstrahls zwischen zwei Spiegeln sich senkrecht zur Bewegung der Erde durch den Äther vollzieht und man ihn nun gleichlaufend mit dieser Bewegung gestaltet, so sollte man feststellen können, daß die durchlaufene Strecke länger geworden ist. Nun stellt man aber fest, daß das nicht der Fall ist. Das kommt nach Fitzgerald und Lorentz daher, daß die zwei Spiegel im zweiten Fall sich einander genähert haben, mit anderen Worten, daß die Tragfläche, auf der sie befestigt waren, sich in der Richtung der Bewegung der Erde zusammengezogen hat, und zwar zusammengezogen um ein Quantum, das genau der Verlängerung entspricht, die man in der von den Lichtstrahlen durchlaufenen Strecke hätte beobachten müssen.

Wenn man nun den Versuch mit den mannigfaltigsten Apparaten wiederholt, stellt man stets das gleiche Ergebnis fest (keine Verschiebung der Streifen). Also hat die Art des Stoffs, aus dem das Instrument besteht (Metall, Glas, Stein, Holz und so weiter) keinen Einfluß. Folglich erfahren alle Körper in der Richtung ihrer Geschwindigkeit im Verhältnis zum Äther eine gleichmäßige Verkürzung, eine entsprechende Zusammenziehung. Diese Zusammenziehung ist so groß, daß sie genau der Verlängerung der von zwei Lichtstrahlen zwischen zwei materiellen Punkten zurückgelegten Strecke entspricht. Diese Zusammenziehung ist also um so größer, je größer die Geschwindigkeit der Körper im Verhältnis zum Äther ist.

Das ist die von Fitzgerald vorgeschlagene Erklärung. Sie schien zunächst durchaus willkürlich und seltsam, und doch wollte sich kein anderes Mittel zeigen, den Versuch Michelsons zu erklären.

Bei genauerem Nachdenken erscheint übrigens diese Zusammenziehung weniger außerordentlich und anstößig für den gesunden Menschenverstand, als es zuerst den Anschein hatte. Wenn

man einen Gegenstand, der seine Form verändern kann, nach Art der Kinderbälle aus Goldschlägerhaut, sehr rasch gegen ein Hindernis wirft, so kann man feststellen, daß er von dem Hindernis leicht verbogen wird, und zwar genau in dem Sinn der Zusammenziehung von Fitzgerald-Lorentz. Der Ball ist nicht mehr kugelförmig, er plattet sich etwas ab, und zwar so, daß sein Durchmesser in der Richtung des Hindernisses kleiner wird. Ungefähr dieselbe Erscheinung tritt ein, nur mit größerer Gewaltsamkeit, wenn ein Schrotkorn oder eine Flintenkugel sich an einer Panzerplatte abplattet. Wenn also die festen Körper aus ihrer Form gebracht werden können — und das ist der Fall, da ja schon die Kälte genügt, ihre Moleküle zusammenzudrängen —, so ist es schließlich nicht ungereimt, nicht unmöglich, sich vorzustellen, daß ein heftiger Ätherwind sie aus der Form bringt.

Aber viel weniger verständlich ist, daß unter gegebenen Bedingungen diese Formänderung identisch, daß sie gleich sein soll für alle Körper, was auch der Grundstoff sein mag. Der eben erwähnte kleine Ball wäre keineswegs so stark abgeplattet, wenn er aus Stahl wäre und nicht aus Goldschlägerhaut.

Kurz, in dieser Erklärung steckt etwas durch und durch Unwahrscheinliches, etwas, was der Vernunft gerade so anstößig ist wie ihrem Zerrbild, dem sogenannten gesunden Menschenverstand. Ist wirklich anzunehmen, daß die Zusammenziehung der Gegenstände, was auch die Begleitumstände der Versuche sein mögen (und man hat sie oft abgewandelt), immer genau die optische Wirkung ausgleicht, die man zu ermitteln sucht? Ist wirklich anzunehmen, daß die Natur wirkt, als ob sie mit uns ein Versteckspiel treibe? Welcher geheimnisvolle Zufall würde für jede Erscheinung die besonderen Umstände herbei-

führen, die vorsehungsartig genau den geforderten Ausgleich zustande bringen?

Offenbar muß da eine Art von Wahlverwandtschaft vorliegen, eine zunächst unbemerkte Verbindung, welche die geheimnisvolle materielle Zusammenziehung von Fitzgerald und die von ihr ausgeglichene Verlängerung der Lichtstrahlen eng miteinander verknüpft. Wir werden sofort sehen, wie Einstein das Geheimnis aufgehellt hat, wie er den Zwillingsmechanismus, der die beiden Erscheinungen miteinander verknüpft, zerlegt und wie er ein Bündel glänzender Lichtstrahlen darüber ausgießt. Aber greifen wir nicht vor. ...

Übrigens ist sie außerordentlich schwach, die Zusammenziehung des Apparats beim Michelsonschen Versuch. So schwach, daß das Instrument, wenn es eine Länge hätte gleich dem Durchmesser der Erde, nämlich 13 000 Kilometer, in der Richtung der Fortbewegung der Erde nur um $6^1/_2$ Zentimeter verkürzt würde. Und das besagt, daß diese Verkürzung angesichts ihrer außerordentlichen Kleinheit keinesfalls im Laboratorium meßbar wäre.

Dazu kommt noch etwas anderes: Selbst wenn der Michelsonsche Apparat um mehrere Zentimeter verkürzt würde (das heißt, wenn die Erde sich viel tausendmal schneller fortbewegen würde), so könnte das doch nicht gemessen und festgestellt werden. Denn in der Tat würden die Metermaßstäbe, deren wir uns zu dieser Messung bedienen würden, in eben diesem Verhältnis verkürzt werden. Die Formänderung eines irdischen Gegenstandes durch die Fitzgerald-Lorentzsche Zusammenziehung kann in keinem Fall durch einen Beobachter hienieden festgestellt werden. Nur ein Beobachter, der nicht an der Fortbewegung der Erde teilnimmt, mit einem Standort zum Beispiel auf der Sonne

oder einem langsamen Planeten, wie Jupiter oder Saturn, könnte sie konstatieren.

Ehe Micromegas seinen heimischen Planeten verließ, um uns seinen Besuch abzustatten, hätte er mit optischen Mitteln feststellen können, daß unsere Erdkugel um einige Zentimeter verkürzt ist in der Richtung ihrer Planetenbahn; vorausgesetzt, daß der liebenswürdige Voltairesche Held mit trigonometrischen Vermessungsinstrumenten versehen gewesen wäre, die unendlich viel genauer wären als die unserer Feldmesser und unserer Astronomen. Auf der Erde angekommen, wäre Micromegas mit allen seinen exakten Instrumenten nicht in der Lage gewesen, diese Verkürzung noch einmal festzustellen. Er wäre gewiß aufs äußerste überrascht gewesen, wenn ihm Einstein, falls er ihn getroffen hätte, das Geheimnis erklärt und aufgehellt hätte, wie er es für uns nun tun wird.

Nach der Stunde und der Jahreszeit, in der man den Michelsonschen Versuch vornimmt, geht die Ortsveränderung des Apparats im Äther mehr oder weniger rasch vor sich. Da der Ausgleich sich immer exakt vollzieht, so kann man sich vornehmen, das Gesetz, das die Zusammenziehung in ihrer Abhängigkeit von den Geschwindigkeiten regelt, zu berechnen, und kann die Zusammenziehung so feststellen, daß sich ein Ausgleich für alle Geschwindigkeiten ergibt. Das hat Lorentz getan. Wenn wir mit V die Geschwindigkeit des Lichts bezeichnen, mit v die Geschwindigkeit des im Äther bewegten Körpers, so hat Lorentz gefunden, daß, wenn ein Ausgleich für alle Fälle sich ergeben soll, die Länge des beweglichen Körpers in der Richtung seiner Bewegung sich im Verhältnis von 1 zu $\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}$ ver-

kürzen muß. Wenn wir als Anschauungsbeispiel den Fall der Fortbewegung der Erde nehmen wollen, wo $v = 30$ Kilometer ist, so sieht man, daß die Erde ihrer Bahn entsprechend sich im Verhältnis von $\sqrt{1 - \frac{1}{100\,000\,000}}$ verkürzt. Der Unterschied der beiden Zahlen ist $\frac{1}{200\,000\,000}$, und der zweihundertmillionste Teil des Durchmessers der Erde ist gleich $6^1/_2$ Zentimeter. Das ist die schon gefundene Zahl.

Diese Formel, welche den Wert der Zusammenziehung für alle Fälle gibt, ist einfach, und ihre Bedeutung ist auch für einen Laien klar. Sie erlaubt uns, den Wert der Verkürzung für jedes Maß der Geschwindigkeit zu berechnen. Man kann leicht daraus ableiten, daß die Erde, wenn sie sich nicht 30 Kilometer, sondern 200 000 Kilometer in der Sekunde fortbewegte, um die Hälfte verkürzt würde in der Richtung ihrer Ortsveränderung (ohne daß ihre Abmessungen in senkrechter Richtung sich ändern würden). Bei dieser Geschwindigkeit wird eine Kugel ein abgeplattetes Ellipsoid, dessen kleine Achse gleich der Hälfte der großen ist; bei dieser Geschwindigkeit wird ein Quadrat ein Rechteck, bei dem die der Bewegung gleichlaufende Seite zweimal kleiner ist als die andere.

Diese Formänderungen müssen für einen unbewegten Beobachter in Erscheinung treten, ein an der Bewegung teilnehmender Beobachter kann sie nicht abschätzen aus den schon genannten Gründen. Die Metermaße, die Messungsinstrumente, ja sogar das Auge des Beobachters selbst, erleiden dieselbe Formänderung.

Man stelle sich vor einen jener seltsam gewölbten, entstellenden Spiegel, wie man sie in gewissen Meßbuden sieht: die einen zeigen uns ein außerordentlich in die Länge gezogenes Spiegel-

bild, ohne daß unser Körperumfang sich geändert hätte; die anderen dagegen zeigen uns ein Bild, in dem wir so groß erscheinen wie sonst, in denen aber unsere vervielfachte Breitendimension einen abenteuerlichen Eindruck macht. Versuchen wir jedoch mit einem in Grade abgeteilten Metermaß in dem Spiegel und an diesen verzerrten Spiegelbildern unsere Höhe und Breite zu messen. Wenn unsere wirkliche Größe 1 Meter 70 Zentimeter beträgt und unsere Breite 60 Zentimeter, so wird das an unser Zerrbild im Spiegel angelegte Metermaß uns immer anzeigen, daß dieses Bild 1 Meter 70 Zentimeter hoch und 60 Zentimeter breit ist. Das im Spiegel gesehene Metermaß hat dieselbe Verzerrung erlitten wie das Spiegelbild.

Daraus ergibt sich, daß, wenn die Erdkugel sogar die oben angenommene phantastische Geschwindigkeit hätte, die Bewohner der Erde keine Möglichkeit hätten, festzustellen, daß die Erde und sie selbst in der Ost-West-Richtung um die Hälfte verkürzt wären. Ein Mann von 1 Meter 70 Zentimeter Größe, der in einem großen quadratischen Bett nordsüdlich orientiert liegt und dem es nun einfiele, sich quer zu legen, wäre, ohne daß er es wüßte, nur noch 85 Zentimeter groß; dafür hätte sich seine Körperbreite in derselben Zeit verdoppelt, denn sie wäre ja nun ostwestlich orientiert. Aber die Erde rückt ja nur 30 Kilometer in der Sekunde vor, und unter diesen Bedingungen beträgt ihre Formänderung im ganzen nur einige Zentimeter.

Im Vergleich mit dieser Geschwindigkeit der Erde beträgt die unserer schnellsten Fahrzeuge nur einen schwachen Bruchteil eines Kilometers in der Sekunde. Für ein Flugzeug, das 360 Kilometer in der Stunde zurücklegt, beträgt die Geschwindigkeit nur 100 Meter in der Sekunde. Das Maximalmaß der Fitzgerald-Lorentzschen Zusammenziehung für unsere schnellsten Fahrzeuge

kann also nur ein so minimaler milliardstel Bruch eines Millimeters sein, daß sie sich unserer Schätzung völlig entzieht. Darum und nur darum scheint uns die Form der uns vertrauten festen Gegenstände unwandelbar und feststehend, was auch die Geschwindigkeit sein mag, mit der sie an uns vorüberziehen. Ganz anders wäre es, wenn diese Geschwindigkeit hunderttausendemal größer wäre.

All das ist höchst seltsam, höchst erstaunlich, höchst phantastisch; es widerstrebt uns, das anzunehmen. Und doch ist das so, wenn die Fitzgerald-Lorentzsche Zusammenziehung, die einzige — wenigstens bis jetzt — mögliche Erklärung des Versuchs von Michelson, wirklich statthat. Aber wir haben schon einige der Schwierigkeiten für die Annahme des Daseins dieser Zusammenziehung gesehen.

Es gibt noch andere. Wenn alles, was wir eben gesagt haben, wahr ist, so behalten allein die im Äther unbeweglichen Gegenstände ihre wahre Gestalt. Diese erleidet eine Formänderung erst bei einer Ortsveränderung im Äther. Unter den Gegenständen, die wir in kugelförmiger Gestalt in der Außenwelt sehen (Planeten, Fixsterne, Geschosse, Wassertropfen und was sonst noch), gäbe es also einige, die wirklich Kugeln sind, während andere, weil ihre Bewegung rascher oder langsamer ist, nur verlängerte oder abgeplattete Ellipsoide wären, welche die Geschwindigkeit deformiert hat. So gäbe es unter den verschiedenen quadratischen Gegenständen solche, die wirkliche Quadrate wären, andere, die, im Verhältnis zum Äther mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausgestattet, in Wahrheit nur Rechtecke wären, deren Langseiten durch die Schnelligkeit scheinbar verkürzt wären. Und wir wären nicht in der Lage, je zu wissen, von welchen unter diesen mit verschiedenen Geschwindigkeiten versehenen Gegen-

ständen wir die richtige Gestalt sehen, von welchen nur die scheinbare, da wir ja nach Ausweis des Michelsonschen Versuches nie eine Geschwindigkeit relativ zum Äther herausbringen können.

Nein, nein, hundertmal nein, riefen die Relativisten. Darin stecken zu viel Schwierigkeiten. Warum dann unaufhörlich mit Lorentz von Geschwindigkeiten relativ zum Äther sprechen, wenn doch kein Versuch eine derartige Geschwindigkeit feststellen kann und wenn doch die Erfahrung die einzige Quelle der wissenschaftlichen Wahrheit ist? Warum anderseits annehmen, daß es unter den sinnenfälligen Gegenständen bevorrechtete gibt, die sich im Unterschied von den anderen in ihrer wahren Gestalt unentstellt zeigen? Warum eine solche Tatsache annehmen, die doch an sich dem Geist der Wissenschaft zuwider ist, der stets den Ausnahmen in der Natur widerstrebt — Wissenschaft gibt es nur vom Allgemeinen —, besonders wenn diese Ausnahmen nicht feststellbar und erkennbar sind?

Soweit waren die Dinge, schon recht weit gediehen vom Gesichtspunkt des mathematischen Ausdrucks der Erscheinungen, aber noch sehr verworren und verwirrend, widerspruchsvoll und sogar anstößig vom physikalischen Gesichtspunkt aus, als endlich Einstein auftrat.

3

Die Einsteinsche Lösung

Vorläufige Ausschaltung des Äthers • Relativistische Auslegung des Michelsonschen Versuchs • Neue Beleuchtung der Geschwindigkeit des Lichts • Erklärung der Zusammenziehung der bewegten Körper • Die Zeit und die vier Dimensionen des Raums • Das Einsteinsche »Intervall« die einzige sinnenfällige Realität

Erste geistvolle Kühnheit. Ohne den Äther ohne weiteres zu jenen veralteten Fluiden zu werfen, die wie das Phlogiston und die Lebensgeister den Zugang zur Wissenschaft vor Lavoisier versperrten; ohne, sage ich, dem Äther jede Realität abzustreiten — denn schließlich muß ein Etwas ein Träger für die Strahlen sein, die uns von der Sonne zukommen —, hat Einstein zunächst bemerkt, daß man in allem Vorhergehenden immer von Geschwindigkeiten relativ zum Äther spricht.

Man kann solche Geschwindigkeiten in keiner Weise feststellen, und es wäre vielleicht einfacher, alle diese Gedankengänge unverworren zu lassen mit dieser Sache, die nun — wirklich oder unwirklich — uns jedenfalls unzugänglich ist, und die bei der holprigen Fahrt der Physiker über diese schwierigen durchfurchten Wege nur die undankbare und störende Rolle des fünften Rads am elektromagnetischen Wagen spielt.

Also erster Punkt: Einstein läßt in seinen Gedankengängen den Äther vorläufig außer Betracht; er leugnet seine Realität nicht, er behauptet sie nicht; er ignoriert ihn.

So wollen wir es nun auch halten nach seinem Beispiel. Wir werden in unseren Darlegungen nicht mehr von dem Medium sprechen, das das Licht fortpflanzt. Wir werden das Licht nur in Betracht ziehen relativ zu den materiellen Wesen oder Gegenständen, die es entsenden oder aufnehmen. Und sofort wird sich unser Gang bedeutend leichter und freier gestalten. Was den Äther der Physiker betrifft, so werden wir ihn eine Zeitlang ins Magazin der unnötigen Requisiten verweisen, zum Äther der Dichter, diesem lieblichen, gestaltlosen, verschwebenden, aber für die Verskunst so reizvollen Äther.

Was zeigt im Grund der Michelsonsche Versuch? Daß ein Lichtstrahl sich auf der Oberfläche von West nach Ost genau mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzt wie von Ost nach West. Stellen wir uns inmitten einer Ebene zwei durchaus gleiche Geschütze vor, die im selben Augenblick bei ruhigem, windstillem Wetter mit derselben Anfangsgeschwindigkeit zwei gleiche Geschosse, das eine nach Westen, das andere nach Osten, abschießen. Es ist klar, daß die beiden Geschosse dieselbe Zeit brauchen werden, um gleiche Räume zu durchlaufen, das eine nach Westen, das andere nach Osten. Die Lichtstrahlen, welche wir auf der Erde erzeugen können, verhalten sich in dieser Hinsicht, in ihrer Fortpflanzung genau wie diese Granaten. Es wäre also am Ergebnis des Michelsonschen Versuchs nichts Erstaunliches, wenn wir von den Lichtstrahlen nur das kennten, was uns dieser Versuch lehrt.

Aber führen wir unseren Vergleich weiter. Betrachten wir die Granate, die von einem dieser Geschütze abgeschossen ist, und

nehmen wir an, daß sie auf eine Panzerplatte, eine Scheibe auffällt an einem gewissen Punkt des Schußfelds und daß bei der Ankunft an diesem Punkt der Granate eine Geschwindigkeit von beispielsweise 50 Meter pro Sekunde geblieben sei. Nehmen wir an, die Scheibe sei auf einem Automobil aufgestellt. Wenn dieses steht, ist die Geschwindigkeit der Granate relativ zur Scheibe, wie wir eben sagten, 50 Meter pro Sekunde am Punkt des Aufstoßes. Nun nehme ich aber an, daß das Fahrzeug und die Scheibe, die es trägt, sagen wir mit einer Geschwindigkeit von 10 Meter in der Sekunde (das macht 36 Kilometer in der Stunde) in der Richtung des Geschützes losfährt und zwar so, daß die Scheibe an ihrer vorherigen Stellung vorüberfährt gerade in dem Augenblick, in dem die Granate ihr zukommt. Es ist klar, daß die Geschwindigkeit der Granate relativ zur Scheibe in dem Augenblick, da sie sie trifft, nicht mehr = 50 Meter ist sondern = 50 + 10 oder 60 Meter in der Sekunde. Dagegen ist wiederum klar, daß, unter übrigens gleichen Umständen, diese Geschwindigkeit nur 50 — 10 = 40 Meter pro Sekunde betragen würde, wenn die Scheibe, statt auf die Kanone loszufahren, in entgegengesetzter Richtung fahren würde. Wäre die Geschwindigkeit der Scheibe in diesem letzteren Fall gleich der der Granate, so ist klar, daß diese sie nur noch mit einer Geschwindigkeit gleich Null treffen würde.

All das versteht sich ganz von selbst. In den Varietétheatern können aus demselben Grunde die Taschenspieler rohe Eier, die von großer Höhe herabfallen, auf einem Teller auffangen, ohne daß sie zerbrechen. Sie brauchen nur dem Teller im Augenblick der Berührung mit dem Ei eine leichte Geschwindigkeit nach abwärts mitzuteilen, welche die Geschwindigkeit des Auffallens entsprechend abschwächt. Daher verstehen es auch die geschickten

Boxer, dem Faustschlag mit einer leichten Bewegung auszuweichen, die seine wirksame Geschwindigkeit abschwächt, während der Schlag dagegen weit härter wird, wenn sie ihm entgegengehen.

Wenn die Lichtstrahlen — wie es beim Michelsonschen Versuch der Fall ist — sich in allem so verhielten wie unsere Geschosse, was würde sich ergeben? Wenn man einem Lichtstrahl sehr rasch entgegengeht, so müßte man finden, daß dieser Strahl relativ zum Beobachter eine vermehrte Geschwindigkeit hat, und daß er dafür eine verminderte Geschwindigkeit hat, wenn der Beobachter vor ihm flieht. Wenn es sich so verhielte, so wäre alles einfach. Die Gesetze der Optik wären dieselben wie die der Mechanik; kein Widerspruch unter ihnen hätte das friedliche Lager der Physiker in Aufregung versetzt, und Einstein hätte die Kräfte seines Genies anderweitig verwenden müssen.

Leider — oder vielleicht glücklicherweise, denn schließlich macht doch bloß das Unvermutete und Geheimnisvolle den Gang der Welt reizvoll — leider ist dem nicht so.

Die physikalischen, ebenso wie die astronomischen Beobachtungen ergeben, daß unter allen Umständen, man möge nun dem Licht sehr rasch entgegeneilen oder vor ihm fliehen, *das Licht relativ zum Beobachter genau dieselbe Geschwindigkeit hat*. Es gibt, um das zu erwähnen, am Himmel Sterne, die sich von uns entfernen oder sich uns nähern, das heißt solche, von denen wir uns entfernen oder denen wir uns nähern mit Geschwindigkeiten von Dutzenden oder Hunderten von Kilometern in der Sekunde. Nun, der Astronom von Sitter hat gezeigt, daß die Geschwindigkeit des Lichts, das uns von ihnen zukommt, für uns jederzeit genau dieselbe ist.

So hat man bis heute durch keinen Kunstgriff, durch keine Bewegung der Geschwindigkeit, mit der uns ein Lichtstrahl zukommt, etwas hinzufügen oder wegnehmen können. Der Beobachter muß feststellen, daß relativ zu ihm die Fortpflanzung des Lichts immer durchaus gleich ist, möge nun dieses Licht von einer Quelle ausströmen, die sich sehr rasch entfernt oder die sich sehr rasch nähert, möge er reißend schnell auf sie zu oder von ihr wegeilen. Der Beobachter kann stets, relativ zu sich selbst, die Geschwindigkeit steigern oder vermindern bei einer Granate, bei einer Tonwelle, bei einem beliebigen beweglichen Körper, wenn er auf diesen beweglichen Körper zueilt oder von ihm wegflieht. Wenn dieser bewegliche Körper ein Lichtstrahl ist, so gelingt nichts Derartiges.

So kann, unter keinen Umständen, die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs sich zu der des Lichts, die es aufnimmt oder aussendet, addieren oder subtrahieren.

Diese gleiche Geschwindigkeit von ungefähr 300 000 Kilometer pro Sekunde, die man stets für das Licht beobachtet, ist in gewisser Hinsicht entsprechend der Temperatur von 273 Grad unter Null, die man den absoluten Nullpunkt heißt und die ebenfalls in der Natur eine unüberschreitbare Grenze bildet.

Alles das beweist, daß die Gesetze, welche die optischen Erscheinungen regeln, nicht dieselben sind wie die klassischen Gesetze der mechanischen Erscheinungen. Lorentz hat nach Fitzgerald sich bemüht, diese scheinbar widersprechenden Gesetze einander anzugleichen und miteinander zu versöhnen mittels der seltsamen Verkürzungshypothese.

Nun wird uns aber Einstein in lichtvoller Weise zeigen, daß diese Verkürzung etwas völlig Natürliches ist, wenn man ge-

wisse Begriffe aufgibt, die, wenn schon klassisch, doch vielleicht falsch sind, und von denen wir uns in althergebrachter Weise leiten ließen bei unserer Schätzung von Längen und Zeiten.

Betrachten wir irgendeinen Gegenstand, zum Beispiel ein Lineal. Was bestimmt für uns die scheinbare Länge dieses Lineals? Doch wohl das auf unserer Netzhaut von den beiden Strahlen abgegrenzte Bild, die von den beiden äußersten Enden des Lineals ausgehen und unserer Pupille gleichzeitig zugehen.

Ich betone dieses Wort absichtlich; denn es ist der Schlüssel zu allem. Wenn unser Lineal unbeweglich vor uns liegt, ist das ganz einfach. Aber wenn man es verschiebt, während wir es betrachten, schon weniger. So wenig sogar, daß vor Einstein die meisten und größten Gelehrten und die ganze klassische Wissenschaft der Meinung waren, das Augenblicksbild eines starren Gegenstands sei notwendigerweise und immer völlig gleich und unabhängig von den Geschwindigkeiten des Gegenstands und des Beobachters. Die ganze klassische Wissenschaft arbeitete mit dem Gedanken, daß die Fortpflanzung des Lichts sich blitzschnell mit unendlicher Geschwindigkeit vollziehe, was nicht der Fall ist.

Ich befinde mich auf der Böschung neben einer Eisenbahnlinie; auf dem Geleise steht einer jener schönen Harmonikawagen der Schlafwagengesellschaft, in denen es so angenehm ist an die Relativität des Raums im Galileischen Sinn zu denken. Ich lasse unmittelbar neben dem Geleise zwei Pfähle aufstellen, einen roten und einen blauen, die genau die Enden dieses Wagens bezeichnen und ihn genau der Länge nach einrahmen. Ohne dann meinen Beobachtungsposten auf der Böschung in der Mitte gegenüber dem Wagen zu verlassen, lasse ich diesen rückwärts führen und an eine Lokomotive von unerhörter Kraft ankoppeln,

die ihn vor mir vorüberfahren soll mit phantastischer Geschwindigkeit, millionenmal derjenigen überlegen, welche die Ingenieure bis jetzt erzielen konnten ... so groß ist die Überlegenheit der Spannkraft der Phantasie über die ärmliche Wirklichkeit. Ich nehme auch an, daß meine Netzhaut vollkommen ist und so eingerichtet, daß die Gesichtseindrücke auf ihr nur so lange dauern wie das Licht, das sie hervorruft.

Diese etwas willkürlichen Hypothesen haben durchaus keinen Einfluß auf den inhaltlichen Gang der Beweisführung; sie gestalten sie bloß etwas bequemer.

Und nun das Problem. Wenn der Schlafwagen, der übrigens aus starrem Metall bestehen soll, in schnellstem Tempo vor mir vorüberfährt, wird er da für mich genau dieselbe scheinbare Länge haben wie im ruhenden Zustand? Anders ausgedrückt, in dem Augenblick, wo ich sein vorderes Ende im Vorbeifahren mit meinem blauen Absteckpfahl zusammenfallen sehe, werde ich da sein hinteres Ende zu gleicher Zeit mit dem roten Pfahl sich decken sehen? Auf diese Frage hätten Galilei, Newton und alle Verfechter der klassischen Wissenschaft mit Ja geantwortet. Und doch muß die Antwort »Nein« lauten nach Einstein.

Hier der sehr einfache Beweis, so wie er aus der Einsteinschen Auffassung folgt. Ich stehe also, wie gesagt, neben dem Geleise in gleichem Abstand von den beiden Pfählen. Wenn das vordere Ende des Wagens sich mit dem blauen Pfahl deckt, sendet es meinem Auge einen gewissen Lichtstrahl zu, den ich der Einfachheit halber »Vorderstrahl« nennen will, und der zusammenfällt mit dem Strahl, den mir der blaue Pfahl zusendet. Dieser Vorderstrahl erreicht mein Auge zu gleicher Zeit wie ein gewisser Strahl, der mir vom hinteren Ende des Wagens zukommt und den ich der Einfachheit halber »Hinterstrahl« nennen will. Fällt

der Hinterstrahl zusammen mit dem Strahl, den mir der rote Pfahl zusendet? Offenbar nicht. In der Tat entfernt sich der Vorderstrahl vom Vorderende des Wagens mit derselben Geschwindigkeit wie der Hinterstrahl vom Hinterende (wie das ein Reisender feststellen könnte, der im Wagen den Michelsonschen Versuch an den Strahlen machen würde). Aber das Vorderende des Wagens entfernt sich von meinem Auge, während das Hinterende sich ihm nähert. Folglich pflanzt sich der Vorderstrahl langsamer gegen mein Auge hin fort als der Hinterstrahl, ohne daß ich das übrigens wahrnehmen könnte, da ich an den beiden Strahlen dieselbe Geschwindigkeit finde, wenn sie mir zukommen. Folglich hat der Hinterstrahl, der meinem Auge zu gleicher Zeit zukommt wie der Vorderstrahl, das hintere Ende des Wagens später verlassen müssen als der Vorderstrahl sein vorderes Ende. Wenn ich also das Vorderende des Wagens mit dem blauen Pfahl zusammenfallen sehe, so sehe ich zu gleicher Zeit das Hinterende des Wagens, das schon seit einiger Zeit über den roten Pfahl hinausgefahren ist.

Also ist die Länge des im schnellsten Tempo fahrenden Wagens, so wie sie mir erscheint, kleiner als die Entfernung der beiden Pfähle, welche die Länge des Wagens im Ruhestand bezeichnete (was zu beweisen war).

Jedermann wird, wenn er nur einigermaßen aufmerkt, diesen Beweis verstehen, dessen elementare Einfachheit nicht ohne Mühe erzielt wurde, der sich aber mit dem mathematischen Beweis Einsteins und seiner Auffassung der Gleichzeitigkeit vollkommen deckt.

Es geht daraus hervor, daß der Wagen oder, allgemeiner gesagt, ein beliebiger Gegenstand durch seine Geschwindigkeit und in der Richtung dieser Geschwindigkeit bezüglich auf einen Be-

obachter diesem verkürzt erscheint. Dasselbe hat offenbar statt, wenn der Beobachter den Ort verändert vor dem Gegenstand, da man ja nur relative Geschwindigkeiten auffassen kann kraft des klassischen Relativitätsprinzips von Newton und Galilei.

Unter diesem neuen Gesichtspunkt wird die Lorentz-Fitzgeraldsche Verkürzung verständlich oder wenigstens annehmbar. Auf diese Weise ist diese Verkürzung nicht mehr die Ursache des negativen Ergebnisses des Michelsonschen Versuchs; sie ist seine Folge. Nun ist alles geklärt, und man versteht jetzt, daß an der klassischen Art, die augenblickliche Dimension der Gegenstände abzuschätzen, etwas nicht einwandfrei war.

Gewiß, die Tatsache, daß Lichtstrahlen, die beim Abgang von ihren Quellen mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausgestattet sind, immer, wenn sie unserem Auge zukommen, genau gleiche und ununterscheidbare Geschwindigkeiten haben, ist befremdend und anstößig für unsere eingewurzelten geistigen Gewohnheiten. Wenn ich einen Vergleich anwenden darf, der bloß dazu dienen soll anzuregen, durchaus nicht zu erklären, so liegt hier vielleicht ein ähnlicher Fall vor wie der, den man bei den Fliegerbomben beobachtet. Bomben eines bestimmten Modells, die vom Flugzeug herab aus einer Höhe von 5000 Meter, und solche, die von 10 000 Meter geschleudert werden und die folglich bei 5000 Meter über dem Boden sehr verschiedene Fallgeschwindigkeiten haben, haben immer bei ihrem Auffallen dieselbe Restgeschwindigkeit. Das ist die abschwächende, ausgleichende Wirkung des Widerstands der Luft, der die Geschwindigkeit hindert, ins Unendliche zuzunehmen, und der sie konstant macht, wenn sie einen gewissen Wert erreicht hat.

Muß man nun annehmen, daß es um unser Auge, um die Gegenstände herum eine Art von Widerstandsfeld gibt, welches

dem einfallenden Licht ähnliche Grenzwerte vorschreibt? Wer weiß es? Übrigens haben solche Fragen vielleicht gar keinen Sinn für den Physiker; dieser kann und wird das Verhalten des Lichts auffassen nur bei seinem Abgang von der materiellen Quelle und bei seiner Ankunft beim bewaffneten oder unbewaffneten Auge. Wie es sich mit seiner Fortpflanzung in dem von Materie leeren Zwischenraum verhält, kann er nicht wissen.

Je mehr wir im übrigen in die Tiefe der neuen Physik dringen, um so mehr müssen wir feststellen, daß sie fast ihre ganze Kraft aus ihrer grundsätzlichen Abkehr von allem schöpft, was nicht in die Erscheinung fällt, was nicht experimentell zu beobachten ist. Weil sie einzig und allein auf Tatsachen gegründet ist (so widerspruchsvoll sie sein mögen), ist unser Nachweis der notwendigen Verkürzung der Körper durch ihre Geschwindigkeit relativ zum Beobachter beweiskräftig.

Wir verstehen jetzt den tiefen Sinn der Fitzgerald-Lorentzschen Verkürzung. Diese scheinbare Verkürzung kommt keineswegs von der Bewegung der Gegenstände bezüglich zum Äther her, sie ist ihrem Wesen nach die Wirkung der Bewegung der Gegenstände und der Beobachter relativ zueinander, also relativer Bewegungen im Sinn der alten Mechanik.

Die größten relativen Geschwindigkeiten, an die wir in der alltäglichen Praxis gewöhnt sind, betragen nur einige Kilometer in der Sekunde. Die Anfangsgeschwindigkeit der Bertagranaten* war nur ungefähr 1300 Meter pro Sekunde. Für so langsame Bewegungen kann die relativistische Verkürzung völlig außer acht gelassen werden. Da sie nie eine Verkürzung feststellen konnte, so hat die klassische Mechanik die Form der Abmessungen starrer Körper als unabhängig von den Beziehungssystemen angesehen.

* Mit denen im Weltkrieg Paris beschossen wurde.

Das war ungefähr wahr. Aber darin besteht der ganze Unterschied zwischen dem Wahren und dem Falschen. Behaupten, 999 990 + 9 sei gleich einer Million, heißt etwas ungefähr Wahres, also Falsches behaupten. Als die runde Gestalt der Erde nachgewiesen war, änderte das sicher nichts an dem Verfahren der Baumeister, die ihre Bauten immer noch konstruieren, wie wenn die vom Senkblei bezeichneten Richtungen stets parallele Linien wären. Ebenso werden unsere Lokomotiven- und Flugzeugfabrikanten noch lange die Formen ihrer Maschinen nicht als in Abhängigkeit von ihren Geschwindigkeiten stehend zu betrachten haben. Was tut's? Der Gesichtspunkt der Praxis ist und kann nur mittelbar derjenige der Wissenschaft sein.

Übrigens hat man seit einigen Jahren auf unserer Erde bewegliche Körper entdeckt, deren Geschwindigkeiten, relativ zu uns, Hunderte von Millionen Kilometer erreichen. Es sind die Projektile der Kathoden- und der Radiumstrahlen. Bei einem solchen Tempo ist die relativistische Verkürzung schon sehr beträchtlich. Wir werden sehen, wie sie tatsächlich zur Beobachtung gebracht wurde.

Fassen wir das bisher Erarbeitete zusammen!

Die Gegenstände erscheinen deformiert in ihrer Bewegungsrichtung und nicht in der Richtung senkrecht hierzu. Also hängt ihre Form, auch wenn sie aus idealem, vollkommen starrem Stoff bestehen, von ihrer Geschwindigkeit relativ zum Beobachter ab. Das ist der dem Wesen nach neue Gesichtspunkt, den die spezielle Relativität Einsteins zur Relativität der klassischen Mechaniker und zur Relativität der Philosophen hinzufügt. Für sie hatten die absoluten Dimensionen eines starren Gegenstands oder einer geometrischen Figur nichts Absolutes, und nur die Verhältnisse dieser Dimensionen hatten Realität.

Der neue Gesichtspunkt ist, daß diese Beziehungen selbst relativ sind, da sie eine Funktion der Geschwindigkeit des Beobachters sind. Das ist eine Art von Relativität zweiten Grads, an welche weder die Philosophen noch die klassischen Physiker gedacht hatten.

Auch die räumlichen Relationen selbst sind relativ in einem schon relativen Raum. In dem Fall unseres oben besprochenen Wagens und der zwei Pfähle, die seine Länge im Ruhestand bestimmen, würde ein Beobachter im Wagen finden, daß der Abstand der zwei Pfähle sich verkürzt, wenn er an ihnen vorbeifährt. Sein Wagen scheint ihm länger als der Zwischenraum zwischen den Pfählen. Ich, der ich zwischen den Pfählen stehe, stelle das Gegenteil fest. Und doch habe ich kein Mittel, dem Fahrenden nachzuweisen, daß er sich getäuscht hat. Ich sehe sehr wohl, daß der Lichtstrahl von dem hinteren Pfahl hinter dem Wagen herläuft und folglich relativ zu ihm eine Geschwindigkeit von weniger als 300 000 Kilometer in der Sekunde hat; ich weiß, daß der Irrtum des Fahrenden daher kommt; aber ich habe kein Mittel, ihn dieses Irrtums zu überführen; denn er wird mir immer und mit Recht antworten: Ich habe die Geschwindigkeit gemessen, mit der mir dieser Strahl zukommt, und ich habe sie gleich 300 000 Kilometer gefunden. Jeder von uns hat in Wirklichkeit recht.

In sehr schneller Bewegung würde ein Quadrat einem Beobachter als Rechteck erscheinen, ein Kreis als Ellipse. Wenn die Erde sich ein paar tausendmal schneller um die Sonne drehte, würden wir sie länglich sehen und gleich einer ungeheuren, am Himmel hangenden Zitrone. Wenn ein Flieger mit phantastischer Geschwindigkeit den Vendômeplatz überfliegen könnte in der Richtung der Rue de la Paix — und wenn seine Netzhauteindrücke sich blitzschnell folgen würden —, so hätte der Platz für ihn

die Form eines sehr abgeplatteten Rechtecks; wenn er ihn der Diagonale nach überfliegen würde, so würde er ihn nicht mehr quadratisch sehen, wie er ist, sondern als Rhombus. Wenn derselbe Flieger im Flug eine Straße überschneiden würde, auf der gut gemästetes Vieh zum Schlachthof dahinzieht, so würde er staunen, denn die Tiere würden ihm außerordentlich dünn und mager vorkommen, ohne daß ihre Länge sich verändert hätte.

Die Tatsache, daß die mit der Geschwindigkeit zusammenhängenden Formänderungen wechselseitig sind, ist eine der merkwürdigsten Folgen von alledem. Ein Mensch, der fähig wäre, die anderen Menschen nach allen Richtungen zu umkreisen mit der phantastischen Geschwindigkeit Shakespearescher Kobolde (nehmen wir einmal an ungefähr 200 000 Kilometer in der Sekunde — was vermag nicht alles ein Shakespearescher Kobold), ein solcher würde finden, daß seine Mitmenschen Zwerge geworden sind, zweimal kleiner als er selbst. So wäre er also wohl selbst ein Riese geworden, eine Art Gulliver unter diesen Liliputanern. Nun, durchaus nicht! So wie die Dinge hienieden sich immer wieder ins Gleichgewicht bringen, würde er selbst denjenigen als ein Zwerg erscheinen, die er für kleiner als sich hält und die des Gegenteils gewiß sind.

Wer hat recht, wer hat unrecht? Beide. Alle Gesichtspunkte sind richtig, aber es gibt nur subjektive Gesichtspunkte.

Und noch etwas: ein beliebiger Beobachter kann die Wesen und die Gegenstände, die nicht mit ihm zusammenhängen nur kleiner sehen — niemals größer! — als die mit seiner Bewegung zusammenhängenden. Wenn ich in diese ernste Darlegung eine etwas leichtere Betrachtung, als sie bei den Physikern üblich ist, einstreuen dürfte, so möchte ich mir die Bemerkung gestatten,

daß das neue System uns so eine endgültige Rechtfertigung des Egoismus oder vielmehr des Egozentrismus verschafft.

Nach dem Raum die Zeit. In einem Gedankengang ähnlich dem, der uns den Abstand der Dinge im Raum als abhängig von ihrer Geschwindigkeit relativ zum Beobachter gezeigt hat, kann man feststellen, daß ihr Abstand in der Zeit gleichfalls davon abhängig ist.

Ich halte es nicht für angezeigt, hier im einzelnen den Einsteinschen Gedankengang in seiner Anwendung auf die Dauer zu wiederholen. Er wäre ganz entsprechend dem, den wir im Kapitel der Länge verwendet haben; ja noch einfacher. Das Ergebnis ist folgendes. Die in Sekunden ausgedrückte Zeit, welche ein Zug braucht, um von einer Station zur anderen zu fahren, ist kürzer für die Passagiere des Zugs als für uns, die wir ihn vorüberfahren sehen und die wir im übrigen mit Zeitmessern versehen sind, die denen der Passagiere völlig gleich sind.* Ebenso werden alle Bewegungen, die Menschen auf einem in der Fahrt befindlichen Fahrzeug machen, für einen selbst unbewegten Beobachter verlangsamt und infolgedessen länger erscheinen und umgekehrt. Damit diese Abwandlungen der Dauer merkbar würden, müßten die Geschwindigkeiten, wie bei der Begleitungserscheinung der Abwandlung der Längen, phantastisch groß sein.

Darum bleibt es doch richtig, daß die Dauer, welche Geburt

* Die beste Begriffsbestimmung einer Sekunde ist folgende: Es ist die Zeit, welche das Licht braucht, um 300 000 Kilometer im leeren Raum und fern von jedem intensiven Gravitationsfeld zu durchmessen. Diese Begriffsbestimmung, die einzige durchaus scharfe, ist im übrigen durch die Tatsache gerechtfertigt, daß es kein besseres Mittel gibt zur Reglung der Uhren als die Licht- oder Hertzschen Signale.

und Tod irgend eines Geschöpfs voneinander trennt, das heißt sein Leben, länger erscheint, wenn dieses Geschöpf mit wahnsinniger Schnelligkeit bezüglich zum Beobachter von der Stelle rückt. In dieser Welt, in der der Schein fast alles ist, ist das nicht unwichtig; soviel bleibt jedenfalls bestehen, daß, philosophisch zu reden, sich bewegen länger dauern bedeutet ... für die anderen, nicht für einen selbst; es heißt auch die anderen länger dauern sehen.

Eine Bestätigung wunderbarer Art — dazu wie tief und unvermutet! — von dem, was schon der Weise erschaut hat: die Unbeweglichkeit ist der Tod.

Noch vor kurzem, vor der Einsteinschen Hedschra, vor der Eröffnung der relativistischen Ära, war jedermann überzeugt, daß der von einem Gegenstand eingenommene Teil des Raums genügend und ausreichend bestimmt sei durch seine Ausmaße im Sinn der Länge, Breite und Höhe. Diese Daten sind das, was man die drei Dimensionen eines Gegenstands heißt; oder wenn man lieber andere Merkzeichen anwenden will, die geographische Länge, Breite und Höhe seiner Punkte; oder in der Astronomie die Aszension, die Deklination und die Distanz.

Es versteht sich von selbst und ist wohlbekannt, daß man außerdem den Zeitpunkt feststellen mußte, den Augenblick, dem jene Daten entsprachen. Wenn ich die Lage eines Luftschiffs durch seine geographische Länge, Breite und Höhe feststelle, so sind diese Angaben genau gültig nur für den in Betracht kommenden Augenblick, da das Luftschiff ja bezüglich zum Merkpunkt von der Stelle rückt — dieser Augenblick muß also auch gegeben sein. In diesem Sinn fühlte man schon lange, daß der Raum von der Zeit abhängt.

Aber die relativistische Theorie zeigt, daß er von ihr in einer noch viel innerlicheren und tieferen Weise abhängt, daß Raum und Zeit ebensosehr auf Gedeih und Ungnade miteinander verbunden sind, wie die siamesischen Zwillinge, welche die Chirurgen nicht trennen können, ohne beide zu töten.

Die Dimensionen eines Gegenstands, seine Form, der scheinbare von ihm eingenommene Raum hängen von seiner Geschwindigkeit ab, das heißt von der Zeit, die der Beobachter braucht, um eine gewisse Entfernung relativ zu diesem Gegenstand zu durchmessen. Schon in dieser Hinsicht hängt der Raum von der Zeit ab; außerdem mißt der Beobachter diese Zeit mit einem Zeitmesser, dessen Sekunden mehr oder weniger schnell dahineilen entsprechend dieser Geschwindigkeit.

Also ist eine Begriffsbestimmung des Raums ohne die Zeit eine Unmöglichkeit; daher sagt man jetzt, die Zeit sei die vierte Dimension des Raums, und der Raum, in dem wir leben, habe vier Dimensionen.

Es ist merkwürdig, daß gewisse gute Köpfe schon in der Vergangenheit eine mehr oder weniger klare Ahnung davon hatten. So schrieb Diderot im Jahre 1777 in der Enzyklopädie im Artikel Dimension: »Ich habe oben gesagt, es sei unmöglich, sich mehr als drei Dimensionen vorzustellen. Ein mir bekannter geistvoller Mann glaubt indessen, man könne die Zeit als eine vierte Dimension betrachten, und das Produkt der Zeit mit der Körperlichkeit sei in gewissem Sinn ein Produkt aus vier Dimensionen. Dieser Gedanke kann vielleicht bestritten werden; aber er hat meines Erachtens einen gewissen Wert, wäre es auch nur der der Neuheit.«

Gewiß ist der Gedanke eines Raums mit mehr als drei Dimensionen zuerst aus der Algebra entsprungen. Da in der Tat

die Linien oder eindimensionalen Räume durch algebraische Ausdrücke ersten Grads dargestellt werden, die Oberflächen oder zweidimensionalen Räume durch Formeln zweiten Grads, die Körper oder dreidimensionalen Räume durch Ausdrücke dritten Grads, so war es natürlich, die Frage aufzuwerfen, ob die Formeln vierten Grads und weiterer Grade nicht ihrerseits auch die algebraische Darstellung einer gewissen Raumform von vier und mehr Dimensionen seien.

Der vierdimensionale Raum der Relativisten ist übrigens nicht ganz das, was sich Diderot dachte. Er ist nicht das Produkt der Zeit mit der Ausdehnung, denn eine Verringerung der Zeit wird hier nicht ausgeglichen durch eine Vermehrung des Raums; ganz im Gegenteil.

Betrachten wir zwei Begebenheiten, zum Beispiel die aufeinander folgenden Durchfahrten unseres Schlafwagenschnellzugs an zwei Stationen. Für einen Passagier im Wagen ist der Abstand der zwei Stationen, gemessen durch die Länge der durchlaufenen Strecke, wie wir gezeigt haben, kürzer als für einen unbewegten Beobachter neben dem Geleise. Die Zeit, welche die beiden Durchfahrten trennt, ist ebenfalls geringer für den ersten Beobachter. In der Tat ist die Zahl der Sekunden und Sekundenbruchteile, die nach dem Zeitmesser, mit dem er versehen ist, verflossen sind, für ihn geringer; das haben wir gesehen.

Mit einem Wort, die räumliche wie die zeitliche Distanz nehmen beide zugleich ab, wenn die Geschwindigkeit des Beobachters zunimmt, und nehmen beide zu, wenn die Geschwindigkeit des Beobachters abnimmt.

So wirkt die Geschwindigkeit (und es handelt sich immer nur, das müssen wir uns merken, um die Geschwindigkeit relativ zu den beobachteten Dingen) gewissermaßen wie eine Doppelbremse,

welche die Zeitdauer verlangsamt und die Längen verkürzt. Wenn man ein anderes Bild vorzieht, so zeigt uns die Geschwindigkeit die Räume und die Zeiten mehr von der Seite, unter einem immer spitzeren Winkel. Raum und Zeit sind also nur wechselnde Perspektivenwirkungen.

Können wir uns den vierdimensionalen Raum vorstellen, das heißt, können wir uns ein anschauliches Bild von ihm machen? Und wenn nicht, wird das nichts gegen die Wirklichkeit dieses Raums beweisen. Jahrhundertelang hat man nicht an die Hertzschen Wellen gedacht, und heute noch sind sie uns nicht unmittelbar bemerklich. Hindert sie das an ihrer Existenz? In Wirklichkeit können wir ja auch den dreidimensionalen Raum nur schwer fassen. Ohne unsere Muskelverschiebungen wüßten wir nichts von ihm. Ein Lahmer und Einäugiger, der aus der Fläche hervortretende Bilder nicht fassen kann — das Reliefbild entsteht nur für das binokulare Sehen, das seinerseits vor allem ein Muskeltasten ist —, er würde mit seinem einzigen unbeweglichen Auge alle Gegenstände auf dieselbe Ebene hinprojiziert sehen, wie auf einem Theatervorhang. Der dreidimensionale Raum wäre ihm unzugänglich.

Ich glaube, gewisse Personen können sich den vierdimensionalen Raum vorstellen. Die aufeinander folgenden Erscheinungen einer Blume in ihren verschiedenen Wachstumsstufen von dem Tag an, da sie nur eine schmächtige grüne Knospe ist, bis zu dem, da ihre erschöpften Blumenblätter traurig abfallen, und die verschiedenen aufeinander folgenden Bewegungen ihrer Blüte unter dem Einfluß des Windes, sie ergeben ein Gesamtbild der Blume im vierdimensionalen Raum.

Gibt es Menschen, die auf einen Blick ein solches Ganze sehen können? Ja, und insbesondere denke ich dabei an die guten

Schachspieler. Wenn ein guter Schachspieler gut spielt, so kann er das, weil er mit einem Blick seines geistigen Auges das zeitliche und räumliche Gesamtbild der aus einem einzigen Anfangszug ableitbaren möglichen Züge mit allen möglichen Gegenzügen auf dem Schachbrett überschaut. Er sieht gleichzeitig die ganze Folge.

Die unterstrichenen Worte widerstreben ihrer Paarung. Wir sind nämlich hier in einem Bereich, wo der Anspruch auf einen Ausdruck der Schattierungen der Wirklichkeit mit den Mitteln der Sprache eine Verwegenheit ist. Ebensogut könnte man schließlich den ganzen Inhalt einer Beethovenschen Symphonie mit Worten fixieren wollen. „Traduttore traditore.“ Wenn dieses Sprichwort richtig ist, so ist der Umstand vor allem daran schuld, daß das Wort das Werkzeug der Übersetzung ist.

Auf diesem Punkt angekommen auf unserem langsamen Anstieg zur relativistischen Physik, haben wir nur ein Schlachtfeld vor Augen, auf dem Leichname und Trümmer liegen.

Raum und Zeit — wir glaubten, diese Haken seien fest an die Mauer genietet, hinter der sich die Wirklichkeit verbirgt, und wir hängten ihnen unsere schwankenden Begriffe von der Außenwelt an, wie wir Kleidungsstücke an Kleiderhaken hängen. Nun liegen sie heruntergerissen und verbogen im Schutt der veralteten Theorien unter den Hammerschlägen der neuen Physik.

Wir wußten ja freilich wohl, daß die Seele der Wesen uns verborgen ist; aber wir glaubten wenigstens ihr Gesicht zu sehen. Und nun beim Nähertreten ist es nur noch eine Maske. Die Außenwelt, die uns Einstein zeigt, ist nur ein Maskenball, und in einem seiner selbst spottenden Trug haben wir selbst diese

Samtmasken mit den schillernden Reflexen, diese flitternden Kostüme gefertigt.

Weit entfernt, uns die Wirklichkeit zu enthüllen, sind Raum und Zeit nach Einstein nur bewegliche, von uns selbst gewobene Schleier, die sie vor unseren Augen verdecken. Und trotzdem — und das ist es, was so seltsam ist und so schwermütig stimmt — trotzdem können wir die Welt ebensowenig ohne Raum und Zeit auffassen, als wir gewisse Mikroben im Mikroskop sehen können, ohne ihnen gewisse Farbstoffe einzuspritzen.

Sollten also Zeit und Raum nur Halluzinationen sein? Und was bliebe dann?

Nein, sagen wir. Denn nachdem sie eben das wankende Gebäude zerstört hat, baut die relativistische Lehre sofort wieder auf. Siehe, hinter den zerrissenen und niedergetretenen Schleiern erhebt sich eine ganz neuartige, viel feinere Welt.

Wenn wir das Weltall auf die gewöhnliche Art beschreiben, getrennt nach den Kategorien von Raum und Zeit, so sehen wir, daß seine Erscheinung vom Beobachter abhängt. Glücklicherweise ist dem nicht so, wenn man es beschreibt nach der einzigen Kategorie jenes vierdimensionalen Kontinuums, in dem Einstein die Erscheinungen verankert und in dem Raum und Zeit vereinigt eng solidarisch sind.

Wenn ich dieses Bild gebrauchen darf, so sind Zeit und Raum wie zwei Spiegel, ein konvexer und ein konkaver, deren Krümmungen um so stärker hervortreten, je größer die Geschwindigkeit des Beobachters ist. Jeder dieser beiden Spiegel gibt für sich ein entstelltes Bild von dem Gang der Dinge. Aber zum glücklichen Ausgleich ergibt es sich, daß, wenn man die beiden Spiegel so verbindet, daß der eine die vom anderen empfangenen Strah-

len zurückstrahlt, das Bild des Gangs der Dinge in seiner nicht entstellten Wirklichkeit wiederhergestellt wird.

Der zeitliche und der räumliche Abstand zweier gegebener sehr nahe sich berührender Ereignisse vermehrt oder vermindert sich, je nachdem die Geschwindigkeit des Beobachters sich vermindert oder sich vermehrt. Das haben wir festgestellt. Aber die Berechnung, die leicht ist dank der oben gegebenen Formel, welche die Lorentz-Fitzgeraldsche Verkürzung ausdrücken soll, zeigt, daß ein festes Verhältnis besteht zwischen den nebeneinander hergehenden Veränderungen des Raums und der Zeit. Genauer gesagt: der zeitliche und der räumliche Abstand zweier sich nahe berührender Ereignisse verhalten sich zahlenmäßig wie die Hypotenuse und eine andere Seite eines Rechtecks zur dritten Seite, die unveränderlich bliebe.*

Nimmt man diese dritte Seite zur Basis, so bilden die zwei anderen Seiten über ihr ein mehr oder weniger hohes Dreieck, je mehr oder je weniger die Geschwindigkeit des Beobachters verringert wird. Diese feste Grundlage des Dreiecks, dessen andere beiden Seiten — der räumliche und zeitliche Abstand — gleichzeitig sich abwandeln mit der Geschwindigkeit des Beobachters, ist also eine von dieser Geschwindigkeit unabhängige Größe.

Diese Größe hat Einstein das Intervall der Ereignisse genannt. Dieses »Intervall« der Dinge in der vierdimensionalen Raumzeitlichkeit ist eine Art Zusammenballung von Raum und Zeit, ein Gemenge von beiden, dessen Bestandteile sich wandeln können, das aber selbst unwandelbar bleibt. Es ist die feste Resultante zweier wechselnder Vektoren. Das so bestimmte »Inter-

* In der Rechnung oder der geometrischen Darstellung, durch die man sie ersetzen kann, ist die Hypotenuse des Dreiecks der zeitliche Abstand, wobei jede Sekunde einer Strecke von 300 000 Kilometer entspricht.

vall der Ereignisse« liefert uns, nach der relativistischen Physik, zum erstenmal eine objektive Darstellung des Weltalls.

Nach dem treffenden Bild von Minkowsky sind »Raum und Zeit nur Phantome. Das einzig Wirkliche ist eine Art innerlicher Verbindung dieser Wesenheiten«.

Die einzige für den Menschen in der Außenwelt greifbare Wirklichkeit, das einzige uns zugängliche wirklich objektive und unpersönliche Faktum ist also das Einsteinsche »Intervall«, so wie es eben bestimmt wurde. Das Intervall der Ereignisse ist für die Relativisten der einzige greifbare Teil des Wirklichen. Von ihm abgesehen gibt es vielleicht noch etwas, aber nichts, das wir erkennen können.

Seltsames Schicksal des menschlichen Denkens! Das Relativitätsprinzip hat infolge der Entdeckungen der modernen Physik seine Nebelschwingen viel weiter getragen als ehemals und bis in Höhen hinauf, die man als unerschwinglich ansah für seinen Adlerflug. Und doch danken wir es vielleicht ihm, wenn unsere Schwachheit zum erstenmal wirklich auf die greifbare Welt, auf die Wirklichkeit die Hand legen kann.

Das Einsteinsche System, dessen aufbauenden Teil wir nun noch betrachten müssen, wird eines Tags verschwinden wie die anderen. Es gibt in der Wissenschaft nur Theorien von zeitweiliger Gültigkeit, niemals solche von ewig dauernder Gültigkeit, und vielleicht eben deswegen hat sie Siege an Siege gereiht. Der Begriff des Intervalls wird sicher alle Zusammenbrüche überleben. Auf ihm wird sich die Wissenschaft der Zukunft aufbauen müssen; auf ihm steigt jetzt schon das kühne Gebäude der heutigen Wissenschaft von Tag zu Tag mehr in die Höhe.

Auch das muß noch scharf im Auge behalten werden. Das Einsteinsche Intervall lehrt uns nichts über das Absolute, über

die Dinge an sich. Auch es kündet uns nur von Beziehungen zwischen den Dingen. Aber die Verhältnisse, die es offenbart, scheinen wahr und unwandelbar zu sein.

Sie haben etwas von jenem Grad objektiver Wahrheit, den die klassische Wissenschaft mit einer vielleicht trügerischen Sicherheit den zeitlichen und räumlichen Verhältnissen der Erscheinungen zuschrieb. In den Augen der neuen Physik waren es nichts als falsche Wagen, und nur das Einsteinsche Intervall übermittelt uns, was vom Wirklichen erkannt werden kann.

So darf die Lehre Einsteins stolz darauf sein, ein für allemal einen Zipfel des täuschenden Schleiers gehoben zu haben, der uns die heilige Nacktheit der Natur verhüllt.

4

Die Einsteinsche Mechanik

Die Mechanik Grundlage aller Wissenschaften • Aufwärts im Zeitstrom • Die Geschwindigkeit des Lichts ist eine unüberschreitbare Grenze • Die Addition der Geschwindigkeiten und der Fizeausche Versuch • Variabilität der Masse • Die Ballistik der Elektrone • Die Gravitation und das Licht der Atom-Mikrokosmen • Materie und Energie • Der Sonnentod

Als Baudelaire schrieb: »Ich hasse die Bewegung, die die Umrisse entstellt«, dachte er, wie die Physiker seiner Zeit, nur an die statischen Formänderungen, die bekannt sind, seit es Menschen gibt, die schauen. Was wir vom Einsteinschen Raum und der Einsteinschen Zeit gesehen haben, überzeugt uns, daß es außerdem noch reine bewegungsmäßige Formänderungen geben muß, vor denen kein sinnenfälliger Gegenstand, so starr und unwandelbar er scheinen mag, geschützt ist.

Die Bewegung entstellt also die Umrisse weit mehr, als Baudelaire dachte, selbst die Linien marmorstarrer Statuen. Diese Entstellung, die man nicht hassen darf, die man lieben muß, weil sie uns dem Herzen der Dinge näher bringt, hat zunächst die ganze Mechanik umgewälzt.

Die Mechanik ist die Grundlage aller Erfahrungswissenschaften, weil sie die einfachste ist und weil die Erscheinungen, die sie untersucht, uns immer, wenn nicht gar ausschließlich, vorliegen,

im Vergleich mit den Erscheinungen, die Gegenstände der anderen, verwickelteren Wissenschaften sind, wie der Physik, der Chemie, der Biologie. Das Umgekehrte ist nicht richtig.

Es gibt zum Beispiel keine einzige chemische oder biologische Erscheinung, an der man nicht Körper in Bewegung, Körper mit einer Masse, Körper, die Energie abgeben oder aufnehmen, in Betracht ziehen müßte.

Dagegen finden sich die Eigentümlichkeiten einer biologischen, chemischen oder physischen Erscheinung, zum Beispiel das Vorhandensein einer elektrischen Spannungsdifferenz oder einer Oxydation oder eines osmotischen Drucks, nicht immer vor bei der Untersuchung der Bewegungen einer schweren Masse und der Kräfte, die auf und durch sie wirken.

Mit Beziehung auf die Mechanik haben Physik, Chemie, Biologie, wenn man sie in dieser Reihe aufführt, Gegenstände von immer verwickelterem Charakter und von immer geringerer Allgemeinheit oder richtiger gesagt Universalität. Diese Wissenschaften sind in ihren Beziehungen abhängig voneinander; sie ergeben so das Bild eines Baums mit seinen Ästen, Zweigen und Blüten. Sie gleichen auch einigermaßen den ineinandergefügten Maststücken, an denen die Militärtelegraphisten ihre Antennen befestigen. Das untere, breitere Teilstück des Mastes trägt das Ganze, aber die oberen Teilstücke des Mastes tragen die zarten, verwickelten Organe.

Das Endziel aller großen Synthetiker der Wissenschaft ist von jeher, wie schon Descartes versucht hatte, alle Erscheinungen auf mechanische Erscheinungen zurückzuführen. Mögen diese Bestrebungen begründet sein oder nicht, mögen sie eines Tags zum Ziel führen oder im Gegenteil a priori zum Scheitern verurteilt sein, weil die physikobiologischen Erscheinungen vielleicht Elemente

enthalten, die ihrem Wesen nach nicht auf mechanische Elemente zurückgeführt werden können, das ist eine Frage, die sehr umstritten worden ist und immer strittig bleiben wird. Wie aber auch in dieser Hinsicht die stets wechselnde Einstellung der Denker sein mag, in einem sind sie einig: in allen natürlichen Erscheinungen, in allen Erscheinungen, die Gegenstand der Wissenschaft sind, ist ein mechanisches Element, für die einen d a s Element schlechtweg und ausschließlich, für die anderen ein zwar sehr wichtiges, aber doch nur ein Teilelement der objektiven Wirklichkeiten.

Wenn ich an alles das hier erinnere, so geschieht es, um zu folgendem Schluß zu kommen. Alles, was der Mechanik eine andere Gestalt gibt, gibt eben damit dem Gebäude der auf sie begründeten Begriffe, das heißt den anderen Wissenschaften, der ganzen Wissenschaft und unserer Auffassung des Weltalls eine andere Gestalt.

Nun werden wir sehen, daß die Einsteinsche Theorie vermöge einer unmittelbaren Folgerung aus dem, was sie uns schon über Zeit und Raum gelehrt hat, auch die klassische Mechanik vollständig umstürzt.

Darum und darum besonders hat sie dem von einer Art von Schlafeshauch angewehten Gebäude der überlieferten Wissenschaft einen Stoß versetzt, dessen Schwingungen so bald nicht zur Ruhe kommen werden.

Wenn wir nun die Einsteinsche Mechanik in Angriff nehmen, so freuen wir uns, daß wir von den etwas zu ausschließlich geometrischen und psychologischen Bewußtseinsgebilden von Zeit und Raum zur unmittelbaren Untersuchung sinnenfälliger Realitäten, der Körper übergehen dürfen. Hier können wir Theorie und Wirklichkeit einander gegenüberstellen, die mathematischen Lehrsätze und die Nachprüfung an der Realität, wir haben die

Genugtuung an Tatsachen, an der Erfahrung zu sehen, was wir von alledem zu denken haben. Zwischen der alten und der neuen Auffassungsweise können wir nun mit Sachkenntnis wählen und nach sichtbaren Unterscheidungsmerkmalen.

Mit einem Wort, wenn ich dieses Bild brauchen darf, solange es sich um die Begriffe Raum und Zeit handelte, die an sich ziemlich leere Rahmen sind, Gefäße, die uns vor allem nur wegen der Flüssigkeiten interessieren, die sie enthalten, da waren wir etwas wie die jungen Leute, die eine Braut bloß nach Beschreibungen wählen sollen. Nun werden wir mit eigenen Augen — und an der Arbeit — die beiden Schönen sehen, die auf unsere Wahl Anspruch machen: die klassische Wissenschaft und die Einsteinsche Theorie. Wir werden sehen, wie sie beide Hand anlegen an den Teig der Dinge, und wir werden die köstlichen Gerichte vergleichen können, die jede von ihnen zu unserer Geistesnahrung daraus gestaltet hat.

Der Wert der Theorien ist an den Tatsachen zu bemessen, und diejenigen, die wie so manche Metaphysik keinen wirklichen Maßstab nachweisen können, der die Entscheidung für sie herbeiführt, sind alle gleich viel und gleich wenig wert. Die Erfahrung, die einzige Quelle des Wissens, von der schon Lukrez sagte: unde omnia credita pendent, und die sinnenfälligen Tatsachen, danach will das Einsteinsche System beurteilt werden.

Das Ergebnis des Michelsonschen Versuchs, die Unmöglichkeit, irgendwelche Geschwindigkeit der Erde relativ zu dem Medium, in dem sich das Licht fortpflanzt, zur Beobachtung zu bringen, diese Tatsache kommt wie gesagt darauf hinaus: man kann durch kein Mittel eine der Geschwindigkeit des Lichts überlegene Geschwindigkeit feststellen und zur Erscheinung bringen. Es emp-

fiehlt sich vielleicht, diese Folgerung aus dem Michelsonschen Versuch in einer handgreiflichen Form zu entwickeln.

In irgendeinem astronomischen Roman tritt ein fingierter Beobachter auf, der sich von der Erde mit einer Geschwindigkeit entfernt, die die des Lichts übertrifft, sagen wir 500 000 Kilometer pro Sekunde, wobei er seine Augen, die wir uns mit kräftigen Brillen bewaffnet denken dürfen, fortwährend auf diesen kleinen, fieberhaft erregten Erdenball gerichtet hat.

Wie wird es gehen? Unser Beobachter wird offenbar die irdischen Erscheinungen verkehrt sehen, da er auf seiner Fahrt Lichtwellen hintereinander einholen wird, die die Erde vor ihm verlassen haben, und zwar seit desto längerer Zeit, je ferner sie von ihr sind. Unser Mensch, richtiger unser Übermensch, wird also nach Verlauf einer gewissen Zeit der Marneschlacht anwohnen. Zunächst wird er das mit Toten besäte Schlachtfeld sehen. Allmählich werden sich diese Toten erheben, um ihre Gefechtsstellungen einzunehmen, und schließlich werden sie korporalschaftsweise sich in Autos setzen, die in schnellstem Tempo Paris zueilen, und zwar rückwärtsfahrend, wo sie dann inmitten der Bevölkerung anlangen, die sich um den Ausgang des Kampfes sorgt, über den ihr unsere Soldaten — aus guten Gründen — keine Kunde bringen können. Kurz: wenn sich unser Beobachter mit einer Geschwindigkeit, die der des Lichts überlegen ist, von der Erde entfernt, so wird er die irdischen Ereignisse zeitstromaufwärts abfließen sehen.

Ganz anders werden die Dinge sich gestalten, wenn unser Beobachter stillesteht und dagegen die Erde sich von ihm mit einer Geschwindigkeit von 500 000 Kilometer pro Sekunde entfernt. Was wird nun geschehen? Es ist klar, daß unser Beobachter die irdischen Ereignisse nun nicht mehr verkehrt, sondern richtig sehen

wird. Der Unterschied wird allerdings zu bemerken sein, daß sie sich ihm mit majestätischer Langsamkeit abzuwickeln scheinen, da die Lichtstrahlen, die die Erde am Abschluß irgendeines Ereignisses verlassen haben, viel längere Zeit brauchen, um zu ihm zu gelangen, als diejenigen vom Anfang dieses Ereignisses.

Um zusammenzufassen: Da die von ihm beobachteten Erscheinungen in beiden Fällen wesentlich verschieden sind, so hätte der Beobachter in unserem Exempel ein Mittel, um festzustellen, ob er sich von der Erde entfernt oder die Erde von ihm, um die wirkliche Fortbewegung der Erde im Raum herauszubringen, Fortbewegung relativ zu dem Medium, das das Licht fortpflanzt, was, wie gezeigt wurde, nicht notwendig bedeutet, relativ zum absoluten Raum.

Der Versuch, den wir uns eben ausgedacht haben, wäre mit den gegenwärtigen Mitteln unseres Laboratoriums nicht leicht zu bewerkstelligen. Wir können keine so phantastischen Geschwindigkeiten erzielen, und wenn wir sie erzielten, so würde der Beobachter nicht viel mehr unterscheiden können. Aber wir haben ein ungeheuerliches Anschauungsbeispiel gewählt, und die Ergebnisse wären ungeheuerlich gewesen. Da es sich um nichts Geringeres handelte als darum, die zeitliche Ordnung umzustürzen.

Nehmen wir an, wir nehmen bescheidenere Mittel in Anspruch, dann wären die Ergebnisse auch bescheidener, aber sie müßten nach den alten Theorien, immerhin mit unseren Instrumenten noch meßbar sein. Nun zeigt aber der Michelsonsche Versuch — der in kleinerem Maßstab der oben beschriebene ist —, daß die erwarteten Unterschiede nicht beobachtet werden. Also entsprechen die Vordersätze, die wir aufgestellt haben, nämlich daß es Geschwindigkeiten geben könne, die der des Lichts im Leeren über-

legen sind, nicht der Wirklichkeit. Also ist diese Geschwindigkeit eine Mauer, eine unüberschreitbare Grenze.

Betrachten wir, was daraus folgt. Der klassischen Mechanik, wie sie von Galilei, Huyghens, Newton begründet wurde, wie sie überall gelehrt wird, liegt ein Prinzip zugrunde, das im letzten Grund, wie alle Prinzipien der Mechanik, auf der Erfahrung beruht. Es ist das Prinzip der Zusammensetzung der Geschwindigkeiten. Wenn ein Schiff in ruhigem Wasser 10 Kilometer in der Stunde zurücklegt und einen Fluß hinabfährt, dessen Geschwindigkeit 5 Kilometer pro Stunde beträgt, so wird die Geschwindigkeit des Schiffs relativ zum unbewegten Ufer, wie man messen und feststellen kann, gleich der Summe der beiden Geschwindigkeiten sein, nämlich 15 Kilometer pro Stunde. Das ist die Regel der Addition der Geschwindigkeiten.

Allgemeiner gesprochen: Wenn ein Körper die Ruhelage verläßt und unter Einwirkung einer Kraft in einer Sekunde eine Geschwindigkeit V erlangt, was wird geschehen, wenn die Wirkung der Kraft eine zweite Sekunde andauert? Er wird nach der klassischen Mechanik eine Geschwindigkeit 2 V erreichen.* Nehmen wir nun einen Beobachter an, der mit einer Fortbewegungsgeschwindigkeit V versehen ist und der zu ruhen glaubt. Für ihn scheint am Ende der ersten Sekunde der Körper in der Ruhe zu sein, weil er dieselbe Geschwindigkeit hat wie der Beobachter.

* Als Beispiel einer identischen Kraft, die in Zeiten wirkt, die schrittweise gleich 1, 2 oder 3 sind, kann man drei Kanonen annehmen vom selben Kaliber, aber von Längen, die gleich 1, 2 und 3 sind, und in denen die Ladungen oder vielmehr ihre vorwärtstreibenden Kräfte genau gleich und stetig sind. Man kann feststellen, daß die Anfangsgeschwindigkeiten der Granaten sich wie 1, 2 und 3 verhalten.

Kraft des klassischen Relativitätsprinzips muß die scheinbare Bewegung dieses Körpers dieselbe sein für unseren Beobachter, wie wenn es wirkliche Ruhe wäre. Am Ende der zweiten Sekunde wird die Geschwindigkeit des Körpers relativ zum Beobachter V sein, und da der Beobachter schon eine Geschwindigkeit V hat, so wird die absolute Geschwindigkeit des Körpers 2 V sein. Ebenso würde man sehen, daß sie 3 V beträgt nach 3 Sekunden, 4 V nach 4 Sekunden und so weiter. Sie könnte also über alle Grenzen hinauswachsen, wenn die Kraft lang genug wirkte?

Ja, sagt die klassische Mechanik. Nein, sagt Einstein, da keine Geschwindigkeit diejenige des Lichts im leeren Raum überschreiten kann.

Wir haben einen Beobachter vorausgesetzt, der relativ zu uns die Geschwindigkeit V hat und der in Ruhe zu sein glaubt. Für ihn war der beobachtete Körper gleichermaßen in Ruhe am Anfang der zweiten Sekunde, da seine Geschwindigkeit dieselbe war wie die des Beobachters. Daraus, daß diese scheinbare Bewegung des Körpers für den Beobachter während der zweiten Sekunde dasselbe ist, was sie für uns während der ersten Sekunde war, schloß die klassische Mechanik, daß seine Geschwindigkeit sich während dieser zweiten Sekunde verdoppelte. Sie wußte eben nicht, was Einstein uns gelehrt hat: daß die Zeit und der Raum, deren sich dieser Beobachter bedient, anders sind als unsere Zeit und unser Raum.

Was ist eine Geschwindigkeit? Es ist der während einer Sekunde durchlaufene Raum. Aber der Raum, den unser bewegter Beobachter durchmißt und der für ihn eine gewisse Länge besitzt, ist in Wirklichkeit für uns, die Ruhenden, kleiner als er glaubt, da die Metermaße, deren er sich bedient, nach Einsteins Nach-

weis durch die Geschwindigkeit verkürzt sind, ohne daß er es bemerken kann.

Dann aber addieren sich die Geschwindigkeiten nicht mehr genau und grenzenlos für einen gegebenen Beobachter, wie das die klassische Mechanik wollte.

Unter der Wirkung einer und derselben Kraft, sagte diese Mechanik, wird ein Körper stets dieselbe Beschleunigung erleiden, was auch die schon erreichte Geschwindigkeit sein möge. Unter der Wirkung einer und derselben Kraft wird die Bewegung eines Körpers um so weniger beschleunigt werden, je rascher er schon bewegt ist.

Nehmen wir als Beispiel ein Mobile. In der Sprache der Physiker hat das Wort durchaus nicht denselben Sinn wie in der der Psychologen. Da es für die ersteren einen Körper in der Bewegung bedeutet, für die letzteren dagegen das, was einen Körper in Bewegung setzt! Ohne mich über die Gedanken zu verbreiten, die diese sprachliche Antinomie nahelegt, die übrigens nur ein Beispiel für den ganzen Abstand der Psychologie von der Physik ist, möchte ich nur das festgehalten wissen, daß ich das Wort hier im Sinn der Physiker gebrauche.

Es sei also ein Mobile versehen, relativ zu mir, mit einer Geschwindigkeit von 200 000 Kilometer pro Sekunde. Versetzen wir auf dieses erste Mobile einen Beobachter. Dieser soll in derselben Richtung und unter denselben Umständen, die wir angenommen haben, ein zweites Mobile fortschleudern, das also relativ zu ihm eine Geschwindigkeit von 200 000 Kilometer haben wird. Aber, sagt nun der Relativist, die Geschwindigkeit, die dieses zweite Mobile relativ zu uns erzielt, ist nicht, wie das die klassische Addition der Geschwindigkeiten fordert, 200 000 + 200 000 = 400 000 Kilometer pro Sekunde, sondern nur 277 000 Kilo-

meter pro Sekunde. Was der zweite bewegte Beobachter für 200 000 Kilometer hielt (weil seine Lineale durch seine Geschwindigkeit verkürzt waren), entsprach in Wirklichkeit nur 77 000 von unseren Kilometern. Wie kann man das berechnen? Indem man die Lorentzsche Formel anwendet, die ich im zweiten Kapitel angeführt habe und die den Betrag der aus der Geschwindigkeit sich ergebenden Verkürzung angibt. Dann findet man sehr leicht folgendes. Wenn man zwei Geschwindigkeiten v_1 und v_2 hat und ihre Resultante w nennt, so behauptete die klassische Mechanik, es sei

$$w = v_1 + v_2.$$

Die Einsteinsche Mechanik lehrt, daß das nicht genau ist und daß in Wirklichkeit (wenn C die Geschwindigkeit des Lichts ist) folgt:

$$w = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{C^2}}.$$

Ich bitte um Entschuldigung, daß ich noch einmal (es soll das letztemal sein!) eine algebraische Formel in diese Darlegung einführe. Aber sie erspart mir eine sehr große Zahl von Umschreibungen, und sie ist so einfach, daß alle Leser — und sie sind sicher zahlreich —, die auch nur eine ganz oberflächliche Kenntnis der Elementarmathematik haben, ihre weittragende Bedeutung und ihre Folgen sofort erfassen werden.

Diese Formel drückt zunächst aus, daß die Resultante der beiden Geschwindigkeiten, sie mag so groß sein wie sie will, die Geschwindigkeit des Lichts nicht überschreiten kann. Ebenso drückt sie aus, daß, wenn eine der Geschwindigkeitskomponenten die des Lichts ist, auch die resultierende Geschwindigkeit den gleichen Wert hat. Endlich drückt sie aus, daß bei den schwachen Geschwin-

digkeiten, mit denen wir es praktisch zu tun haben (das heißt, wenn die Geschwindigkeitskomponenten weit geringer sind als die des Lichts), die Resultante nur um einen ganz kleinen Betrag geringer, also fast gleich der Summe der beiden Geschwindigkeiten ist, wie es die klassische Mechanik verlangt.

Diese ist, das dürfen wir nie vergessen, auf der Erfahrung aufgebaut. Man kann verstehen, daß unter diesen Umständen Galilei und seine Nachfolger, die nur mit verhältnismäßig langsam bewegten Körpern zu tun hatten, auf ein Prinzip gekommen sind, das für sie offensichtlich richtig war, während es in Wahrheit nur ein erster Annäherungswert ist.

Es ist zum Beispiel die Resultante von zwei Geschwindigkeiten, die jede gleich 100 Kilometer pro Sekunde ist (eine Größe, die die Geschwindigkeiten, die ehemals von Galilei und Newton erzielt werden konnten, unendlich übersteigt) nicht gleich 200 Kilometer, sondern gleich 199,999978 Kilometer. Der Unterschied beträgt kaum 22 Millimeter auf 200 Kilometer. Man versteht, daß die alten Versuche derartige Unterschiede nicht an den Tag bringen konnten.

Unter den bestätigenden Beweisen für das neue Gesetz der Zusammensetzung der Geschwindigkeiten kann man einen aufführen, der verblüffend ist und der sich aus einem schon alten Versuch Fizeaus ergibt.

Denken wir uns eine mit einer Flüssigkeit, etwa mit Wasser, gefüllte Röhre, die ein Lichtstrahl der Länge nach durchläuft. Man kennt die Geschwindigkeit des Lichts im Wasser (die weit geringer ist als der entsprechende Betrag in der Luft oder im leeren Raum). Denken wir uns nun, das Wasser sei nicht mehr unbewegt in der Röhre, sondern fließe, kreise in dieser mit einer

gewissen Geschwindigkeit. Was wird beim Austritt aus der Röhre die Geschwindigkeit des Lichtstrahls sein, der diese bewegte Flüssigkeit durchlaufen hat? Diese Frage hat sich Fizeau gestellt, indem er die Begleitumstände beim Versuch variierte.

Die Geschwindigkeit des Lichts im Wasser beträgt ungefähr 220 000 Kilometer pro Sekunde. Es handelt sich hier um eine so rasche Fortpflanzung, daß ein großer Unterschied ist zwischen dem klassischen Additionsgesetz und dem der Einsteinschen Mechanik. Nun stimmen aber die Ergebnisse des Fizeauschen Versuchs streng überein mit der Einsteinschen Formel und sind im Widerspruch mit derjenigen der alten Mechanik. Zahlreiche Beobachter, darunter neuerdings der holländische Physiker Zeeman, haben mit peinlichster Genauigkeit den Fizeauschen Versuch wieder aufgenommen, und die Ergebnisse waren genau die gleichen.

Als Fizeau im letzten Jahrhundert diesen Versuch machte, hat man natürlich versucht, seine zahlenmäßigen Ergebnisse im Licht der alten Theorien auszulegen. Aber das hatte zu gänzlich unwahrscheinlichen Hypothesen geführt. So war man zur Erklärung der Ergebnisse Fizeaus genötigt gewesen — das war die Theorie Fresnels — anzunehmen, der Äther werde teilweise vom Wasser in seiner Bewegung mitgenommen, aber dieses teilweise Mitgenommenwerden variiere mit der Länge der fortgepflanzten Lichtwellen und sei nicht gleich für die blauen und für die roten Strahlen. Eine Folgerung, die anstößig und kaum angängig ist.

Das neue, von Einstein gegebene Gesetz der Zusammensetzung der Geschwindigkeiten erklärt dagegen mit außerordentlicher Genauigkeit die Ergebnisse Fizeaus.

Die Tatsachen, als Schiedsrichter und Kriterien ausschlaggebend, zeigen hier, daß die neue Mechanik der Wirklichkeit ent-

spricht, nicht die alte, wenigstens die alte nicht in ihrer hergebrachten Form.

Und da schon können wir den Finger legen auf die Schönheit und tiefe Wahrheit (wissenschaftliche »Wahrheit« ist, was sich wissenschaftlich »bewährt«) der Einsteinschen Lehre. Jetzt schon haben wir den Nachweis dafür, inwiefern eine wissenschaftliche, eine physikalische Theorie sich herrlich von einem zwar mehr oder weniger zusammenhängenden, aber willkürlichen philosophischen System unterscheidet.

Die Erfahrung, dieser höchste Richter, entscheidet zugunsten der Einsteinschen Mechanik gegen die klassische Mechanik. Wir werden noch andere Beispiele dafür sehen. Keines werden wir finden, das für das Gegenteil spricht.

Aber nun noch etwas anderes: das neue Gesetz der Zusammensetzung der Geschwindigkeiten und das Dasein einer Geschwindigkeitsgrenze, die gleich der Geschwindigkeit des Lichts ist, können in einer Sprache zum Ausdruck kommen, die von der bisher gebrauchten verschieden ist. Wir haben bis jetzt nur von Geschwindigkeiten, von Bewegungen gesprochen. Sehen wir nun, wie die Dinge sich gestalten, wenn wir zu gleicher Zeit die besonderen Eigenschaften der bewegten Gegenstände, der Körper, der Materie ins Auge fassen.

Bekanntlich ist das kennzeichnende Merkmal der Materie die sogenannte Trägheit. Ist die Materie im Ruhezustand, so braucht es eine Kraft, um sie in Bewegung zu setzen. Ist sie in Bewegung, so braucht es eine Kraft, um sie zum Stillstand zu bringen. Es braucht eine, um die Bewegung zu beschleunigen. Es braucht eine, um sie aus ihrer Bahn abzulenken. Diesen Widerstand, den die Materie den Kräften entgegensetzt, die ihren Ruhe- oder Be-

wegungszustand zu ändern streben, nennt man Trägheit. Die verschiedenen Körper können diesen Kräften einen mehr oder weniger großen Widerstand entgegenstellen. Richtet sich eine Kraft auf einen Gegenstand, so wird sie ihm eine gewisse Beschleunigung verleihen. Dieselbe Kraft auf einen anderen Gegenstand gerichtet, wird ihm, für gewöhnlich, eine andere Beschleunigung verleihen. Ein Rennpferd, das sein Maximum von Kraft einsetzt, wird rascher und leichter laufen, wenn es einen winzigen Jockei trägt, als wenn es einen 100 Kilo wiegenden Reiter trägt. Ein Zugpferd wird den Wagen rascher von der Stelle bringen, wenn er leer ist, als wenn er mit Waren beladen ist. Man kann einen Karren mit einer Kraftanstrengung in Bewegung setzen, die einen Güterwagen nicht von der Stelle brächte.

Wenn eine Lokomotive, an die einige Wagen angekoppelt sind, plötzlich anzieht, so ist die dem Zug nach der ersten Sekunde verliehene Geschwindigkeit, von einer Konstante abgesehen, das, was man seine Beschleunigung heißt. Zieht diese Lokomotive unter denselben Umständen mit einem viel längeren Zug an, so bemerkt man, daß ihre Geschwindigkeit geringer ist. Daher kommt der von Newton in die Wissenschaft eingeführte Begriff der Masse der Körper, der ihre Trägheit mißt.

Wenn in unserem Beispiel die Lokomotive das zweitemal eine zweimal geringere Beschleunigung bewirkt, so bezeichnet man das mit dem Ausdruck, die Masse des zweiten Zugs betrage das Doppelte derjenigen des ersten. Findet man, daß die von der Lokomotive erzielte Geschwindigkeit dieselbe ist für drei mit Korn und für einen mit Eisenstangen beladenen Wagen, so sagen wir, die beiden Züge haben dieselbe Gesamtmasse.

Kurz, die Massen der Körper sind Daten, die herkömmlicherweise bestimmt werden durch die Tatsache, daß sie umgekehrt

proportional den durch eine und dieselbe Kraft bewirkten Beschleunigungen sind. Anders ausgedrückt, die Masse eines Körpers ist der Quotient aus der Kraft, die auf ihn wirkt, und der Beschleunigung, die sie ihm verleiht. Poincaré sagte hübsch anschaulich: »Die Massen sind Koeffizienten, deren Einführung in die Rechnung bequem ist.«

Wenn es eine bemerkbare, sinnenfällige Eigenschaft der Körper gibt, von der jedermann gewissermaßen eine natürliche Anschauung hat, so ist es die der Masse der Körper. Nun, eine einigermaßen schärfere Zergliederung zeigt uns also unsere Unfähigkeit, die Sache anders zu bestimmen als durch verhüllte konventionelle Formeln. Die poincaristische Formel scheint zunächst anstößig als Geständnis unserer Ohnmacht. Und doch ist sie richtig. Die Masse ist nur ein Koeffizient, nur eine konventionelle Schöpfung unserer Schwachheit.

Und doch blieb uns noch etwas zur Stütze, zwar nicht für unseren Trieb nach Gewißheit — wie lange schon haben die Gelehrten, die dieses Namens wert sind, auf Gewißheit verzichtet! —, wohl aber für unser Bedürfnis der Sauberkeit in der Ableitung, in der Einreihung der Erscheinungen. Man hielt die Masse, den so bequemen und so schön definierten Koeffizienten, wenigstens für konstant.

Auch hier heißt es die Ansprüche herabstimmen, leider oder vielleicht auch — glücklicherweise, da schließlich ja doch nichts über das Behagen geht, auf etwas Neues zu stoßen.

Die alte Mechanik lehrte uns, die Masse sei konstant für denselben Körper, unabhängig also von der Geschwindigkeit, die dieser Körper schon erlangt hatte. Woraus folgte — wie oben auseinandergesetzt —, daß, falls eine Kraft zu wirken fortfährt, die nach einer Sekunde erreichte Geschwindigkeit nach zwei Se-

kunden sich verdoppeln, nach drei Sekunden sich verdreifachen muß und so weiter ins Unendliche.

Aber eben haben wir gesehen, daß die Geschwindigkeit in der zweiten Sekunde weniger zunimmt als in der ersten und so weiter, immer weniger, bis die Geschwindigkeit des bewegten Körpers, wenn sie diejenige des Lichts erreicht hat, nicht mehr zunehmen kann, die wirkende Kraft mag sein wie sie wolle.

Was heißt das? Wenn die Geschwindigkeit des Körpers in der zweiten Sekunde sich weniger steigert, so setzt sie der beschleunigenden Kraft einen größeren Widerstand entgegen. Alles geht so vor sich, wie wenn seine Trägheit, seine Masse anders geworden wäre. Das kommt darauf hinaus: die Masse der Körper ist nicht konstant, sie hängt von ihrer Geschwindigkeit ab, sie wächst mit dieser Geschwindigkeit.

Für die geringen Geschwindigkeiten ist dieser Einfluß unmerkbar. Weil sie nur diese beobachten konnten, haben die Begründer der klassischen Mechanik — einer Erfahrungswissenschaft — bemerkt, die Massen seien sichtlich konstant, und sie glaubten daraus schließen zu dürfen, sie seien absolut konstant. Für große Geschwindigkeiten trifft das nicht mehr zu.

Dementsprechend gilt für kleine Geschwindigkeiten in der neuen wie in der alten Mechanik, daß die Körper für unsere Beobachtung den Kräften, die ihre Bewegung zu beschleunigen, und denen, die sie aus ihrem Weg zu lenken, die ihre Bahn abzubeugen streben, denselben Trägheitswiderstand entgegensetzen. Bei großen Geschwindigkeiten trifft das nicht mehr zu.

Die Masse wächst also rasch mit der Geschwindigkeit, bis sie schließlich unendlich wird, wenn diese Geschwindigkeit der des Lichts gleichkommt. Ein Körper mag sein wie er will, die Geschwindigkeit des Lichts wird er nie erreichen oder überschreiten

können, da er zur Überschreitung dieser Grenze einen unendlichen Widerstand überwinden müßte.

Zur Veranschaulichung mögen hier einige Ziffern folgen, die zeigen, in welchen Proportionen die Massen mit der Geschwindigkeit variieren. Die Berechnung ist leicht, dank der schon mitgeteilten Formel, die die Beträge der Fitzgerald-Lorentzschen Verkürzung gibt.

Eine Masse von 1000 Gramm wird 2 Zentigramm schwerer sein bei einer Geschwindigkeit von 1000 Kilometer pro Sekunde; sie wiegt 1060 Gramm bei einer Geschwindigkeit von 100 000 Kilometer pro Sekunde; 1341 Gramm bei einer Geschwindigkeit von 200 000 Kilometer pro Sekunde; 2000 Gramm (also das Doppelte) bei einer Geschwindigkeit von 259 806 Kilometer pro Sekunde; 3905 Gramm bei der Geschwindigkeit von 290 000 Kilometer pro Sekunde.

Das besagt die neue Theorie. Wie kann sie sich durch Beweis bewähren? Das wäre noch vor 50 Jahren unmöglich gewesen, als man nur die ärmlichen kleinen Geschwindigkeiten unserer irdischen Fahrzeuge und Geschosse kannte, die damals — und das galt auch für die Granaten — nie über ein Kilometer pro Sekunde hinausgingen. Selbst die Planeten haben nur Geschwindigkeiten, die viel zu schwach sind für diese Verifikation, und der Merkur zum Beispiel, der schnellste von allen, legt nur 100 Kilometer pro Sekunde zurück, was immer noch nicht genügt.

Wenn wir nur über solche Geschwindigkeiten verfügt hätten, so wären wir nicht in der Lage gewesen, durch Beweis zu entscheiden, wer recht hatte, die alte Mechanik, die die Masse für konstant erklärte, oder die neue, die sie für variabel erklärte.

Die Kathodenstrahlen und die Betastrahlen des Radiums haben uns die zu einer Beweisführung benötigten Geschwindigkeiten geliefert.

Diese Strahlen bilden sich aus einem ununterbrochenen Schießen mit sehr schnellen kleinen Geschossen von einer Masse, die geringer ist als der zweitausendste Teil eines Wasserstoffatoms, die im übrigen mit negativer Elektrizität geladen sind und die man Elektronen heißt.

Die Kathodenröhren und das Radium setzen ein beständiges Schießen mit diesen kleinen Geschossen ins Werk, die nicht mit Melinit, sondern mit Elektrizität geladen sind, die an Größe hinter den Granaten der europäischen Artillerien weit zurückstehen, dagegen aber mit unendlich größeren Anfangsgeschwindigkeiten versehen sind, neben denen selbst die der Bertakanone sich sehr ärmlich ausnimmt.

Wie hat man nun die Geschwindigkeit dieser Geschosse messen können?

Man weiß, daß die elektrisierten Körper aufeinander wirken: sie ziehen sich an oder stoßen sich ab. Unsere Elektronen sind mit Elektrizität geladen. Wenn man sie also in ein elektrisches Feld versetzt, zwischen zwei Scheiben, die mit den beiden Enden einer elektrischen Maschine oder einer Induktionsspule verbunden sind, so werden sie einer Kraft ausgesetzt, die sie von ihrer Bahn ablenken muß. Die Kathodenstrahlen werden also durch ein elektrisches Feld abgelenkt werden. Diese Ablenkung wird von der Schnelligkeit der Geschosse abhängen, sie wird auch von ihrer Masse abhängen, daß heißt von dem Widerstand der Trägheit, den sie den Kräften entgegensetzt, die sie abzulenken suchen.

Das ist aber noch nicht alles. Die von diesen Geschossen getragenen elektrischen Ladungen sind in Bewegung und sogar in

rascher Bewegung. Elektrizität in Bewegung ist ein elektrischer Strom; nun wissen wir aber, daß die Ströme von den Magneten, von den magnetischen Feldern abgelenkt werden. Die Kathodenstrahlen werden also vom Magnet abgelenkt werden. Die Ablenkung wird wie die erste von der Schnelligkeit und von der Masse des Geschosses abhängen. Nur wird sie nicht in der gleichen Weise davon abhängen. Unter im übrigen gleichen Umständen wird die magnetische Ablenkung größer sein als die elektrische, wenn die Ablenkung groß ist. In der Tat ist an der magnetischen Ablenkung die Wirkung des Magneten auf den Strom schuld, sie wird um so größer sein, je intensiver der Strom ist; der Strom wird um so intensiver sein, je größer die Geschwindigkeit ist, da ja die Bewegung des Geschosses den Strom hervorbringt. Dagegen wird die Bahn unserer kleinen Geschosse unter dem Einfluß der elektrischen Anziehung um so weniger abgelenkt sein, je rascher das Geschoß ist.

So wird verständlich sein, daß man, wenn man einen Kathodenstrahl erst der Wirkung eines elektrischen, dann der eines magnetischen Feldes aussetzt, durch einen Vergleich der beiden Ablenkungen zugleich die Geschwindigkeit des Geschosses und seine Masse messen kann (bezogen auf die bekannte elektrische Ladung des Elektrons).

So findet man ungeheure Geschwindigkeiten von mehreren Dutzenden Kilometer an aufwärts bis zu 150 000 Kilometer in der Sekunde und mehr. Die Betastrahlen des Radiums sind noch schneller und erreichen Geschwindigkeiten, die der des Lichts sehr nahekommen und mehr als 290 000 Kilometer pro Sekunde betragen. Damit haben wir Geschwindigkeiten, die wir brauchen, um zu sehen, ob die Masse mit ihnen zunimmt oder nicht.

Ist das festgestellt, so braucht es zum völligen Verständnis des Gangs des Versuchs nur noch einiger Worte über die merkwürdige Erscheinung elektrischer Trägheit, die man Selbstinduktion heißt. Wenn man einen elektrischen Strom herstellen will, so empfindet man einen gewissen anfänglichen Widerstand, der aufhört, sobald der Strom hergestellt ist; wenn man dann den Strom unterbrechen will, so hat er das Bestreben weiter zu bestehen, und es kostet ebensoviel Mühe ihn aufzuhalten wie das Anhalten eines einmal im Gang befindlichen Wagens. Das kann die alltägliche Erfahrung zeigen. Manchmal verlassen die Kontaktrollen eines Straßenbahnwagens einen Augenblick den Draht, der den Strom zuführt; in diesem Augenblick sieht man Funken sprühen. Warum? Ein Strom ging durch, der vom Draht zur Kontaktrolle ging; wenn die Kontaktrolle sich einen Augenblick vom Draht entfernt, wobei ein Luftzwischenraum entsteht, der ein Hindernis für das Einströmen der Elektrizität ist, so hält der Strom darum noch nicht an, weil er sozusagen im Gang ist: er überspringt das Hindernis in Funkenform. Diese Erscheinung ist die sogenannte Selbstinduktion.

Die „Selfinduction" oder einfach die „Self", wie die Elektrizitätsarbeiter sagen, ist eine richtige Trägheitserscheinung. Das umgebende Medium setzt der Kraft einen Widerstand entgegen, welche einen elektrischen Strom herzustellen strebt, und derjenigen, die einen schon vorher hergestellten zu unterbrechen strebt, ebenso wie die Materie der Kraft widersteht, die sie von der Ruhe in Bewegung überzuführen strebt. Es gibt also neben der mechanischen Trägheit eine richtige elektrische Trägheit.

Aber unsere Kathodengeschosse, unsere Elektronen sind geladen. Wenn sie sich in Bewegung setzen, bringen sie einen elektrischen Strom hervor; stehen sie still, so hört der Strom auf.

Neben der mechanischen Trägheit müssen sie also gleichermaßen die elektrische Trägheit besitzen. Sie haben sozusagen zwei Trägheiten, das heißt zwei träge Massen, eine wirkliche mechanische und eine scheinbare, die auf die Erscheinungen der elektromagnetischen Selbstinduktion zurückzuführen ist. Wenn man die beiden Ablenkungen, die elektrische und magnetische der Betastrahlen des Radiums oder der Kathodenstrahlen, untersucht, so kann man feststellen, welches in der Gesamtmasse des Elektrons der Anteil dieser beiden Massen ist. In der Tat variiert die elektromagnetische Masse, die den eben dargelegten Ursachen entspricht, mit der Geschwindigkeit nach gewissen Gesetzen, welche die Theorie der Elektrizität uns kennen lehrt. Beobachtet man das Verhältnis zwischen der Gesamtmasse und der Geschwindigkeit, so kann man also sehen, welches der Anteil der wirklichen und unveränderlichen Masse ist und derjenige der scheinbaren Masse elektromagnetischer Herkunft.

Der Versuch ist angestellt und wiederholt worden von sehr geschickten Physikern. Das Ergebnis ist wohl geeignet, uns zu überraschen: die wirkliche Masse ist gleich Null, die ganze Masse der Partikel ist elektromagnetischer Herkunft. Das ist wohl dazu angetan, unsere Gedanken über das Wesen der sogenannten Materie vollkommen umzugestalten. Aber, »das ist eine andere Geschichte«.

Nun hat man sich gefragt — und darauf wollten wir hinauskommen nach diesen Umwegen, auf denen wir das Gestrüpp umgangen haben —, ob das Verhältnis der Masse zur Geschwindigkeit der Kathodengeschosse dasselbe sei wie das, auf das uns das Relativitätsprinzip geführt hat.

Das Ergebnis der Versuche ist durchaus klar und übereinstimmend. Einige unter ihnen haben sich auf Betastrahlen er-

streckt, die einer Masse entsprechen, deren Betrag das Zehnfache der ursprünglichen Masse ist. Das Ergebnis ist folgendes: Die Massen variieren mit der Geschwindigkeit und genau nach den Ziffern der Gesetze der Einsteinschen Dynamik.

Eine neue und sehr wertvolle experimentelle Bestätigung, die auch in der Richtung des Nachweises liegt, daß die klassische Mechanik nur grobe Annäherungswerte gab, die höchstens gültig waren für die mäßigen Geschwindigkeiten, mit denen wir in dem lächerlich beschränkten Lauf des täglichen Lebens zu tun haben.

So ist die Masse der Körper, diese Newtonsche Eigenschaft, die man für das Symbol der Beständigkeit hielt und für ein Gegenstück dessen, was in der sittlichen Ordnung der Dinge die Vertragstreue ist, nichts anderes mehr als ein kleiner variabler Koeffizient, der auf und ab schwankt und relativ ist je nach unserem Gesichtspunkt. Kraft der wechselseitigen Beziehung, die wir schon festgestellt haben, als es sich um die auf die Geschwindigkeit zurückzuführende Verkürzung handelte, vermehrt sich die Masse eines Gegenstands gleicherweise nicht nur, wenn *sie* sich fortbewegt, sondern auch wenn der Beobachter sich fortbewegt, übrigens ohne daß ein anderer mit dem Gegenstand verbundener Beobachter je den Unterschied feststellen könnte.

So wird bei einem Lineal, das sich mit einer Schnelligkeit von ungefähr 260 000 Kilometer pro Sekunde bewegt, nicht nur die Länge um die Hälfte vermindert, sondern zu gleicher Zeit die Masse verdoppelt werden.

Die physikalischen Begriffe, die man für die bestbegründeten, die festesten, die unerschütterlichsten hielt, werden so, entwurzelt durch den Orkan der neuen Mechanik, etwas Schwebendes, Weiches, Plastisches, von der Geschwindigkeit Gemodeltes.

Andere Bestätigungen der neuen Formel, die ganz unabhängig von der eben dargelegten sind, wurden neuerdings von den Physikern geliefert.

Eine der erstaunlichsten verdankt man der Spektroskopie.

Wenn man einen Sonnenstrahl von einer feinen Spalte her durch die Kante eines Glasprismas fallen läßt, so entfaltet sich bekanntlich dieser Strahl bei seinem Austritt aus dem Prisma wie ein prächtiger Fächer, dessen Rippen der Reihenfolge nach von den Farben des Regenbogens gebildet werden. In diesem farbigen Fächer entdeckt eine aufmerksame Beobachtung feine Unterbrechungen, schmale lichtlose Lücken. Man könnte an Schnitte denken, die man mit der Schere in dem bunten Schleier angebracht hat: das sind die dunkeln »Streifen« im Sonnenspektrum. Jeder dieser Streifen entspricht einem bestimmten chemischen Element und dient zu seiner Erkennung sowohl im Laboratorium als in der Sonne und in den Sternen.

Schon lange hat man dargelegt, daß diese Streifen von Elektronen herrühren, die sich sehr rasch um das Atomzentrum drehen. Ihre plötzlichen Geschwindigkeitsänderungen bringen in dem umgebenden Mittel eine Welle hervor (ähnlich der im Wasser durch den Wurf eines Kieselsteins entstehenden); das ist eine der das Atom kennzeichnenden Lichtwellen. Sie tut sich durch einen der Streifen im Spektrum kund. Der dänische Physiker Bohr hat diese Theorie vor kurzem in allen ihren hier belanglosen Einzelheiten entwickelt und gezeigt, daß sie für die verschiedenen Spektralstreifen, die den chemischen Elementen entsprechen, eine genaue Erklärung zu bieten vermag. Diese unterscheiden sich, um es noch einmal zu sagen, durch die Zahl und die Anordnung der Elektronen, die in ihren Atomen gravitieren.

Nun hat der deutsche Gelehrte Sommerfeld folgende Erwägung angestellt. Die Elektronen, die in der Nähe des Atomzentrums gravitieren, müssen eine viel größere Geschwindigkeit haben als die, welche weiter außen gravitieren, so wie die unteren Planeten, Merkur und Venus, bei ihrem Umlauf um die Sonne viel größere Geschwindigkeiten haben als die oberen Planeten, Jupiter, Saturn. Daraus folgt, falls die Vorstellungen von Lorentz und Einstein richtig sind, daß die Masse der inneren Elektronen eines Atoms größer sein muß als die der äußeren, und zwar merklich größer, denn die Elektronen drehen sich mit ungeheuren Geschwindigkeiten. Die Berechnung zeigt nun, daß unter diesen Umständen jene Spektrumstreifen eines chemischen Elements in Wirklichkeit aus einer Summe von mehreren kleinen feinen Streifen nebeneinander bestehen müssen. Und eben das ist nachträglich (1916) von Paschen festgestellt worden. Er hat gefunden, daß die Struktur der feinen Streifen aufs allergenaueste der von Sommerfeld angekündigten entspricht: Welche erstaunliche Bestätigung der Hypothese! Welche Genauigkeit der neuen Mechanik!

Aber das ist nicht alles. Bekanntlich sind die X-Strahlen Schwingungen entsprechend denen des Lichts, von derselben Herkunft, aber von viel geringerer Wellenlänge, das heißt von viel stärkerer Frequenz. Während also das Licht von den äußeren Elektronen jenes Miniatursonnensystems, das man Atom heißt, herrührt, rühren die X-Strahlen von den schnellsten, dem Zentrum nächsten Elektronen. Daraus folgt, daß die besondere Struktur der feinen Streifen, die auf die Variation der Elektronenmasse infolge der Geschwindigkeit zurückzuführen ist, bei den Streifen der X-Strahlen noch viel ausgesprochener sein muß als bei den Spektralstreifen des Lichts. Und wirklich hat das Ex-

periment das nachgewiesen. Die Ziffern, die die beobachteten Tatsachen kennzeichnen, entsprechen genau den Berechnungen der neuen Mechanik, der mit der Geschwindigkeit eintretenden Variation der Masse, die man in Aussicht nahm.

Es ist also festgestellt, daß die im Mikrokosmus jedes Atoms auftretenden Erscheinungen den Gesetzen der neuen Mechanik gehorchen und nicht denen der alten und daß im besonderen die bewegten Massen darin variieren, wie es eben diese Mechanik verlangt.

Die Erfahrung, die »einzige Quelle aller Wahrheit«, hat gesprochen.

Da sind wir nun sehr weit weg von den geläufigen Anschauungen. Lavoisier hat uns gelehrt, daß die Materie nicht geschaffen und nicht vernichtet werden könne, daß sie sich erhalte. Was er damit meinte, war, daß die Masse unveränderlich sei, und er hat das mit der Wage bewiesen. Und nun haben vielleicht die Körper überhaupt keine Masse — wenn sie ganz und gar elektromagnetischer Herkunft ist —, und nun ist jedenfalls diese Masse nicht mehr unveränderlich. Das bedeutet nicht, daß das Gesetz Lavoisiers nun sinnlos geworden ist. Es bleibt etwas bestehen, das mit der Masse zusammenfällt bei kleinen Geschwindigkeiten. Aber schließlich hat unsere Auffassung der Materie doch eine gewaltige Umwälzung erfahren. Was wir Materie nannten, das war vor allem die Masse, das an ihr, was uns zugleich am meisten greifbar und am meisten dauerhaft erschien. Und nun besteht diese Masse ebensowenig als die Zeit und der Raum, in denen wir sie unterbringen zu können glaubten. Diese Wirklichkeiten waren nur Phantome.

Man möge die etwas schwierigen Partien in dieser Darlegung entschuldigen. Aber die neue Mechanik eröffnet uns so über-

raschend neue Horizonte, daß sie etwas mehr als einen raschen Blick von oben herab beanspruchen darf. Will man eine weite Landschaft in einer unerforschten Welt betrachten, so darf man keinen Anstand nehmen, manchmal einen etwas steilen Hang hinanzusteigen, auch wenn der Anstieg uns vorübergehend den Atem benimmt.

Endlich gibt es noch einen Grundbegriff der Mechanik, den Begriff der Energie, der im Licht der Einsteinschen Theorie uns einen unerwarteten Anblick bietet, was wiederum in hohem Maß an der Erfahrung sich bewährt.

Wir haben gesehen, daß ein mit Elektrizität geladener und in Bewegung befindlicher Körper seiner Ortsveränderung einen gewissen Widerstand entgegensetzt vermöge jener elektrischen Trägheit, die man die Selbstinduktion heißt. Berechnung und Erfahrung zeigen, daß diese elektrische Trägheit sich steigert, wenn man die Dimensionen des ein gewisses Quantum Elektrizität tragenden Körpers vermindert, ohne diese zu ändern. In der Tat sind die Elektronen — auf dem Boden dieser Hypothesen und falls die Trägheit ausschließlich elektromagnetischen Ursprungs ist — nur noch eine Art von elektrischen Furchungen, die sich in dem Medium bewegen, das die elektrischen und die Lichtwellen fortpflanzt und das man Äther heißt.

Die Elektronen sind nichts mehr an sich selbst. Sie sind nach Poincarés Ausdruck nur noch etwas wie »Löcher im Äther«, um die sich dieser bewegt, nach Art eines Sees, der Strudel bildet, die dem Vordringen eines Boots Widerstand leisten.

Dann aber muß, je kleiner die Löcher im Äther sind, die Erregung des Äthers um sie entsprechend bedeutender und die Trägheit des »Lochs im Äther«, aus dem das untersuchte Körper-

chen besteht, folglich größer sein. Was wird daraus folgen? Nach Messungen, die man vorgenommen hat, hat bekanntlich die Masse der kleinen Sonne jedes Atoms, des positiven Kerns — um den die Elektronenplaneten sich drehen — es hat, sage ich, dieser positive Kern eine weit größere Masse als die eines Elektrons. Wenn diese Masse und wenn die entsprechende Trägheit ebenfalls elektromagnetischen Ursprungs sind, so folgt, daß der positive Kern der Atome viel kleiner ist als das Elektron.

Wenn wir das Atom des Wasserstoffs betrachten, dieses leichtesten und einfachsten der Gase, so wissen wir, daß es von einem einzigen Planeten gebildet ist, von einem einzigen negativen Elektron, das um die kleine Zentralsonne, den positiven Kern, sich dreht. Wir wissen auch, daß die Masse des Elektrons zweitausendmal kleiner ist als die des Atoms des Wasserstoffs. Aus alledem folgt — die Berechnung zeigt es —, daß der positive Kern einen zweitausendmal kleineren Radius haben muß als das Elektron. Nun haben die Versuche der englischen Physiker festgestellt, daß die großen Partikeln Alpha der Radiumstrahlen mehrere Hunderttausende Atome durchdringen können, ohne merkbar abgelenkt zu werden von dem positiven Kern. Man folgert daraus, daß dieser in der Tat viel kleiner als das Elektron ist; wie es dem entspricht, was die Theorie voraussah.

Alles das führt unausweichlich auf den Gedanken, daß die Trägheit aller konstituierenden Teile der Atome, das heißt der ganzen Materie, ausschließlich elektromagnetischer Herkunft ist. Es gibt keine Materie mehr; es gibt nur noch elektrische Energie, welche uns infolge der Rückwirkungen, welche das umgebende Mittel auf sie ausübt, auf den trügerischen Glauben an das Dasein von jenem substanzartigen, massiven Etwas führt, das die bisherigen Geschlechter Materie zu nennen gewöhnt waren.

Aber aus alledem ergibt sich — ebenfalls durch einfache und elegante Berechnungen und Schlußfolgerungen Einsteins, deren Gedankengang ich hier nur mehr andeuten als darlegen kann —, daß Masse und Energie ein und dasselbe sind oder wenigstens nur die beiden Seiten ein und derselben Medaille. Also keine materielle Masse mehr, nichts als Energie im sinnenfälligen Weltall. Was ist das für ein seltsames, in einer Hinsicht fast spiritualistisches Ergebnis der modernen Physik!

Nach alledem wäre der größte Teil der Masse der Körper auf eine gewaltige, verborgene innere Energie zurückzuführen. Diese Energie sehen wir allmählich in den radioaktiven Körpern sich zerstreuen, den einzigen bis jetzt nach außen offenen Vorratsbehältern von Atomenergie.

Wenn alles das richtig ist, wenn Energie und Masse gleichgeltende Begriffe sind, wenn Masse nur Energie ist, so muß umgekehrt die freie Energie massive Eigenschaften haben. Und in der Tat hat zum Beispiel das Licht eine Masse. Genaue Versuche haben wirklich gezeigt, daß ein Lichtstrahl, der auf einen materiellen Gegenstand trifft, auf ihn einen Druck ausübt, der gemessen worden ist. Das Licht hat eine Masse, also hat es ein Gewicht, wie alle Massen. Wir werden übrigens, bei Gelegenheit der neuen Form, die Einstein dem Problem der Gravitation gibt, einen anderen direkten Beweis von eigenartiger Schönheit kennenlernen dafür, daß das Licht schwer ist.

Man kann berechnen, daß das Licht, das die Erde von der Sonne im Lauf eines Jahres erhält, etwas mehr als 58 000 Tonnen wiegt. Das ist wenig, wenn man an die ungeheuerliche Kohlengewichtsmasse denkt, die nötig wäre, um auf diesem Erdkügelchen die im Durchschnitt ziemlich mäßige Temperatur zu

unterhalten, welche die Sonne hier unterhält, für den Fall, daß diese plötzlich erlöschen würde.

Der Unterschied hat folgenden Grund: Wenn wir mit einem gewissen Gewichtsquantum Kohle heizen, nutzen wir nur einen schwachen Teil seiner verfügbaren Energie, seine chemische Energie. Alle ihre inneratomische Energie bleibt uns unzugänglich. Das ist bedauerlich, sonst würden einige Gramm Kohlen genügen, um das ganze Jahr hindurch alle Städte und alle Fabriken unseres Landes zu heizen. Wie viele Probleme wären damit vereinfacht! Wenn die Menschheit einmal aus der barbarischen Unwissenheit und Unbehilflichkeit herausgekommen ist, das heißt in ein paar hundert Jahrhunderten, werden wir das sehen. Ja, das werden wir sehen. Das wird wahrlich ein schönes Schauspiel sein, über das man sich mit Recht im voraus freuen darf.

Inzwischen verliert die Sonne, wie alle Gestirne, wie alle weißglühenden Körper, allmählich etwas von ihrem Gewicht in dem Maß, wie sie strahlt. Aber mit einer solchen Langsamkeit, daß wir nicht fürchten müssen, es so bald zu erleben, daß sie vor unseren Augen erlischt, wie jene auserlesenen Wesen, die daran sterben müssen, daß sie sich zu sehr hingegeben haben.

Und nun noch, um mit der Einsteinschen Mechanik abzuschließen, etwas von einer sehr anregenden Anwendung dieser Gedanken von der Identität der Energie und der Masse.

Es gibt in der Chemie ein wohlbekanntes Elementargesetz, das sogenannte Gesetz von Prout. Es besagt, daß die Atommassen aller Elemente ganze Vielfache derjenigen des Wasserstoffs sein müssen. Da dieser von allen bekannten Körpern derjenige ist, dessen Atom das leichteste ist, so ging das Gesetz von Prout von der Hypothese aus, daß alle Atome nach einem fun-

5

Die allgemeine Relativität

Schwere und Trägheit • Zweideutigkeit des Newtonschen Gesetzes • Gleichwertigkeit von Gravitation und beschleunigter Bewegung • Die Granate von Jules Verne und das Trägheitsgesetz • Warum die Lichtstrahlen gravitieren • Wie man die Strahlen der Sterne wägen kann • Eine Verfinsterung, aus der Licht strahlt

Nun sind wir an der Schwelle des Geheimnisses angelangt: es ist die Gravitation.

Im vorigen Kapitel hat man gesehen, wie Einstein in großartiger Weise in einem einzigen Gesetz die langsamen Bewegungen der massiven Gegenstände und die viel rascheren des Lichts vereinheitlicht hat. Ehedem waren das getrennte Provinzen im Weltall, anarchisch, ohne gemeinsames Gesetz.

Dieselben Gesetze beherrschen, wie wir jetzt wissen, Mechanik und Optik. Wenn es anders zu sein schien, so war der Grund, daß bei den Geschwindigkeiten, die der des Lichts nahe kommen, die Längenmaße und die Massen der Gegenstände für den Beobachter einer Abwandlung unterliegen, die bei den gewöhnlichen Geschwindigkeiten unmerkbar ist. In der Kraft der Synthese glänzt die Einsteinsche Mechanik. Ihr danken wir es, wenn wir in diesem an Überraschungen reichen Weltall, in dem unsere Gedanken und unsere Beklemmungen so flüchtig dahinziehen, mehr Einheit als vorher, also mehr Harmonie, mehr Schönheit entdecken.

Und doch ließ die Relativitätstheorie bis jetzt eine grundlegende, eine wesentliche Erscheinung beiseite, eine die überall und immer im Kosmos verbreitet ist: die Gravitation, diese geheimnisvolle Eigenschaft des Körpers, welche die untersten Atome beherrscht wie die Riesengestirne und ihre Bahnen in majestätische Kurven lenkt.

Die allgemeine Anziehung, die wir auf der Erde Schwere heißen, war unter den anderen Erscheinungen etwas wie eine jäh aufsteigende Insel, ohne Beziehung zur übrigen Naturphilosophie.

Die Einsteinsche Mechanik — so wie wir sie bis jetzt dargelegt haben — ging an dieser Insel vorüber, ohne an ihr zu landen. Daher hieß man sie unter dieser Form die Theorie der beschränkten Relativität. Um das Werkzeug einer vollendeten Synthese aus ihr zu machen, galt es auch noch die Erscheinung der Gravitation in sie aufzunehmen. Damit hat Einstein sein Werk gekrönt, und so hat sein System die wunderbare Form erreicht, die man jetzt unter dem Namen der verallgemeinerten Relativität bezeichnet.

Einstein hat die allgemeine Gravitation aus ihrer »glänzenden Vereinzelung« herausgezogen und hat sie, die nun fügsame, überwundene, an den Triumphwagen seiner Mechanik gekettet. Noch mehr, er hat für das berühmte Gesetz Newtons eine genauere Formel gefunden, welche die Erfahrung, diese Richterin, gegen die man keine Berufung einlegen kann, als die einzig richtige bestätigt hat.

Wie er dazu gelangt ist, welche feine und starke Kette von Schlußfolgerungen und Berechnungen, die auf Tatsachen beruhen, ihn dazu führte, das möchte ich jetzt auseinandersetzen, wobei ich auch diesmal wieder sorgfältig die Stacheldrahtnetze der mathematischen Fachsprache zu umgehen versuche.

Warum hat Newton — und die ganze klassische Wissenschaft nach ihm — geglaubt, daß die Gravitation, daß der Fall der Körper, nicht in die Mechanik einbegriffen ist, deren Gesetze er formuliert hat? Mit einem Wort, warum hat er die Gravitation als Kraft betrachtet — oder um einen unbestimmteren aber allgemeineren Ausdruck zu gebrauchen — als einen Vorgang, der bewirkt, daß die schweren Körper sich nicht frei im leeren Raum von der Stelle bewegen.

Wegen des Trägheitsprinzips. Dieser Grundsatz, die Grundlage der ganzen Newtonschen Mechanik, kann so ausgedrückt werden: Ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, behält seine Geschwindigkeit und seine Richtung unveränderlich bei.

Warum gibt man den Dampfmaschinen jene massiven Räder bei, die man Schwungräder heißt und die sich im Leeren drehen? Weil das Trägheitsprinzip ganz sicher ungefähr richtig ist. Wenn die Maschine bei einem Ruck plötzlich stillstehen will oder unvermutet in rascheren Gang gerät, ist das Schwungrad da, um die Dinge wieder ins gleiche zu bringen. Dieses Schwungrad, das von seiner erworbenen Geschwindigkeit fortgerissen ist und seinerseits die Maschine fortreißt, hat den Zweck, diese Geschwindigkeit zu erhalten, und verhindert und berichtigt so das Verlangsamen wie die Beschleunigungen, die der Zufall mit sich bringt. Dieses Prinzip ist also auf der Erfahrung aufgebaut, genauer auf den Versuchen Galileis, der es bestätigt hat, indem er Billardkugeln auf verschieden geneigten Flächen rollen ließ.

So kann man zum Beispiel feststellen, daß eine auf einer wagrechten, vollkommen glatten Fläche laufende Billardkugel dieselbe Richtung beibehält und eine Geschwindigkeit, die gleichmäßig bliebe, wenn nicht der Widerstand der Luft und die Reibung auf der Fläche dazukämen, die sie allmählich auf Null

bringen. Man beobachtet in der Tat, daß die Kugel, wenn man diese Reibungswiderstände verringert, ihre Geschwindigkeit immer länger beizubehalten strebt.

Das Trägheitsprinzip Newtons gründet sich auf eine Menge ähnlicher Erfahrungen. Dieses Prinzip hat also keineswegs den Charakter einer evidenten mathematischen Wahrheit. Wie wahr das ist, sieht man daraus, daß die Alten ganz entgegen unserer klassischen Mechanik der Meinung waren, die Bewegung höre auf, sobald die Ursache aufhöre, die sie bewirkt habe. Gewisse griechische Philosophen hatten noch eine andere Betrachtungsweise; sie dachten, daß jeder Körper, wenn nichts dazwischentrete, das ihn störe, eine Kreisbewegung vollziehe, weil das die vornehmste aller Bewegungen sei.

Wir werden weiterhin sehen, wie das Trägheitsprinzip der generalisierten Mechanik Einsteins ein merkwürdiges Verwandtschaftsverhältnis mit dieser letztgenannten Auffassung zeigt und zu gleicher Zeit mit der merkwürdigen Atomenabweichung, dem „clinamen", das der große und tiefe Lukrez der freien Bahn seiner Atome zuschrieb. Aber wir wollen nicht vorgreifen.

Diese Behauptung, daß ein frei sich selbst überlassener und der Einwirkung jeder Kraft entzogener Gegenstand seine Geschwindigkeit und seine Richtung beibehält, dieses Trägheitsprinzip kann einen höheren Anspruch als den, eine Erfahrungswahrheit zu sein, nicht machen.

Nun können aber die Beobachtungen, die dieses Prinzip begründen, die Galileis im besonderen und alle diejenigen, welche die Physiker sich ausdenken können, nicht vollkommen beweiskräftig sein, weil es in der Praxis unmöglich ist, einen beweglichen Körper völlig der Wirkung jeder äußeren

Kraft, Luftwiderstand, Reibung und anderem mehr, zu entziehen.

Ich weiß wohl, daß Newton dieses Prinzip nicht bloß auf irdische Beobachtungen, sondern auf die der Gestirne gegründet hat. Er hat bemerkt, daß die Planeten, wenn man absieht von der anziehenden Wirkung der anderen Himmelskörper und soweit es möglich ist, das zu beurteilen, ihre Richtung und ihre Geschwindigkeit mit Bezug auf das Sternengewölbe beizubehalten scheinen. Aber die Relativisten denken, daß die im vorigen Satz hervorgehobenen Worte, die dem Gedanken Newtons entsprechen, einen Schluß aus unbewiesenen Voraussetzungen bedeuten. Sein Gedankengang setzt von vornherein voraus, daß die Planeten nicht frei kreisen, daß sie in ihre Bewegung von einer Kraft gezwungen sind, die Newton die allgemeine Anziehungskraft genannt hat.

Wir werden sehen, wie Einstein auf den Gedanken gebracht worden ist, daß dies vielleicht keine Kraft ist, und dann wird der Schlußsatz der Folgerung ganz anders. Dem sei wie ihm wolle, das klassische Trägheitsprinzip ist eine auf Experimente und dazu immer unvollkommene Experimente gegründete Wahrheit, die als solche der dauernden Nachprüfung durch die Tatsachen unterstellt bleiben muß. Alles, was man behaupten kann, ist, daß es in der Praxis, das heißt ungefähr, dem entspricht, was man feststellen kann.

Newton sah es nicht so an, nicht als eine mehr oder weniger genaue Annäherungswahrheit, sondern als eine unumstößliche Wahrheit.

Als er beobachtete, daß die Planeten sich nicht geradlinig, sondern in Kurven bewegen, schloß er deshalb daraus — und das ist das Zweifelhafte, das wir ihm zum Vorwurf machen —,

daß sie einer Zentralkraft, der Gravitation, unterstellt seien. Daher schienen ihm die schweren, die gravitierenden Körper nicht mehr unter der Zuständigkeit der mechanischen Gesetze, die er zunächst für die frei sich selbst überlassenen Körper aufgestellt hatte. Das ist, mit einem Wort, der Grund, warum das Gravitationsgesetz Newtons und die Gesetze der Dynamik Newtons Dinge sind, die man unterscheiden und trennen muß.

Dieses große Genie, dieses Gehirn, das seinesgleichen nicht hatte, war trotzdem ein menschliches Gehirn. Descartes hat sich auch vorgenommen, er wolle nichts behaupten, als was er klar und deutlich auffasse, und hat dann doch sehr merkwürdige Behauptungen in die Welt gesetzt und sehr dunkle Hypothesen über die Zirbeldrüse und über die Lebensgeister. Ähnlich hat Newton den Grundsatz ausgesprochen: Hypotheses non fingo und dann doch die Hypothesen der absoluten Zeit und des absoluten Raums zur Grundlage seiner Mechanik gemacht. Zur Grundlage seiner genialen Gravitationstheorie hat er eine Hypothese gemacht, die übrigens a priori eher annehmbare Hypothese des Daseins einer besonderen Gravitationskraft.

Das sind Schwächen, von denen die größten Männer nicht frei sind. Sie müssen uns nur um so mehr zur Bewunderung der lichtvollen Seiten ihres Werks antreiben. So tief ist die von den großen Urbarmachern des Unbekannten gezogene Furche, selbst wenn sie von der geraden Linie abbiegt, daß zweieinhalb Jahrhunderte vorübergegangen sind, ehe man auch nur daran dachte zu untersuchen, ob die Unterscheidung Newtons zwischen den rein mechanischen und den Gravitationserscheinungen wirklich begründet ist.

Der große Ruhm Einsteins liegt darin begründet, daß er einen siegreichen Versuch hierzu gemacht hat. Es ist sein Ruhm, daß er

erst mit manchen für endgültig gehaltenen Errungenschaften aufgeräumt und daß er dann Gravitation und Mechanik in einer großartigen Synthese verschmolzen hat. So hat er uns ein tieferes Gefühl von der erhabenen Einheit der Welt verschafft.

Selbst ehe wir weiter eindringen in die tiefen, wunderbaren Gänge der allgemeinen Relativität, ist es in Wahrheit a priori evident, daß das Newtonsche Gesetz der allgemeinen Anziehung jetzt nicht mehr als befriedigend betrachtet werden kann.

Er behauptet: Die Körper ziehen sich an im direkten Verhältnis ihrer Masse und im umgekehrten Verhältnis des Quadrats ihrer Entfernungen. Was heißt das? Wir haben gesehen, daß die Massen der Körper variieren mit ihren Geschwindigkeiten. Wenn man zum Beispiel die Masse des Planeten Erde in die Berechnungen einführt, in denen das Newtonsche Gesetz in Betracht kommt, um was handelt es sich da? Handelt es sich um die Masse, welche die Erde hätte, wenn sie sich nicht um die Sonne drehen würde? Oder handelt es sich vielmehr um die größere Masse, welche sie infolge ihrer Translation besitzt? Aber diese Translation hat nicht immer dieselbe Geschwindigkeit, da die Erde ja eine Ellipse beschreibt und nicht einen Kreis. Welchen Wert dieser veränderlichen Masse soll man dann in die Berechnung einführen? Denjenigen, der ihrer Sonnennähe oder ihrer Sonnenferne entspricht, dem Zeitraum, wo die Erde sich schneller vorwärts bewegt oder demjenigen, da sie ihre Sphärenbewegung verlangsamt? Sollte man übrigens nicht auch auf die Geschwindigkeit der Translation des Sonnensystems Rücksicht nehmen, die nach den Jahreszeiten die Geschwindigkeit der Erde steigert oder vermindert?

Was sollen wir anderseits im Newtonschen Gesetz als Abstand von Erde und Sonne einsetzen? Soll es der Abstand sein relativ zu einem Beobachter auf der Erde oder der Sonne oder vielmehr zu einem, der unbewegt im Mittelpunkt der Milchstraße steht und an der Bewegung unseres Systems durch diese nicht teilnimmt. Auch hier wieder bekommt man verschiedene Werte je nach den verschiedenen Fällen, da die räumlichen Abstände, wie wir mit Einstein gesehen haben, variieren nach der Geschwindigkeit relativ zum Beobachter.

Das Newtonsche Gesetz ist also trotz seiner so einfachen, so ästhetischen Form zweideutig und unexakt. Ich weiß wohl, daß die Unterschiede, von denen wir eben sprachen, sehr geringfügig sind, aber man darf sie darum doch nicht aus dem Spiel lassen; die Berechnung zeigt es.

Es ist also für die Einsteinianer sicher — noch ganz abgesehen von den Erwägungen, in die wir jetzt eintreten —, daß das Newtonsche Gesetz in seiner klassischen Form dunkel ist, daß es abgeändert und vervollständigt werden muß.

Diese vorläufigen Bemerkungen haben vielleicht den Wert, daß sie uns dem Geisteszustand näher bringen, in dem Bilderstürmer sich doch wohl befinden müssen — und in der Wissenschaft sind die Bilderstürmer manchmal die Arbeiter für den Fortschritt. Die Heiligenbilder, um die es sich hier handelt, sind die Auffassung Newtons von der Gravitation und sein Gravitationsgesetz; und diese Bemerkungen mögen uns mit dem Schauspiel vertraut machen, daß diesen ehrwürdigen Bildern respektswidrige Schläge versetzt werden.

Laplace hat in seiner Darlegung des Weltsystems geschrieben: »Man kann nicht umhin zuzugeben, daß in der Naturphilosophie nichts besser bewiesen ist als das Prinzip der allgemeinen Gra-

vitation im Verhältnis der Massen und im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernungen.«

Es gibt keinen besseren Maßstab als diesen Satz des berühmten Gelehrten für die Größe des Fortschritts, den wir Einstein verdanken, Einstein, der, wie wir sehen werden, das vermeintliche Symbol, das vollendete Musterbeispiel der wissenschaftlichen Wahrheit, vervollkommnet hat: das berühmte Newtonsche Gesetz.

Die Gravitation, die Schwere hat das gemein mit der Trägheit der Körper, daß sie eine völlig allgemeine Erscheinung ist. Alle materiellen Gegenstände, alle Körper, ihr physikalischer und chemischer Zustand mögen sein wie sie wollen, sind zu gleicher Zeit träge (sie leisten gemäß ihrer Masse den Kräften Widerstand, die sie von der Stelle zu rücken streben) und schwer (das heißt sie fallen, wenn sie freigelassen sind).

Nun gibt es aber etwas Merkwürdiges, das Newton schon festgestellt hatte, ohne daß er bemerkte, was es bedeutete, und das er nur für ein einfaches außerordentliches Zusammentreffen hielt: die Zahl, welche die Trägheit eines Körpers bestimmt, ist dieselbe, welche sein Gewicht bestimmt. Diese Zahl ist die Masse.

Nehmen wir das Beispiel, dessen ich mich in einem früheren Kapitel bedient habe bei Gelegenheit der Einsteinschen Mechanik: Wenn zwei von zwei durchaus gleichen Lokomotiven gezogene Züge unter denselben Bedingungen sich von der Stelle bewegen und wenn die dem ersten Zug mitgeteilte Geschwindigkeit nach einer Sekunde das Doppelte der Geschwindigkeit des zweiten ist, so kann man daraus schließen, daß die Trägheit, die träge Masse des zweiten Zugs (wenn man absieht von den Reibungen

der Geleise) doppelt so groß ist als die des ersten. Wenn wir dann unsere beiden Züge auf die Wage stellen, so finden wir, daß auch das Gewicht des zweiten Zugs doppelt so groß ist wie das des ersten.

Dieser Versuch, der unter der Form, die wir ihm hier geben, grober Art ist, wurde von den Physikern mit äußerster Genauigkeit mit Hilfe feiner Methoden angestellt, auf die hier wenig ankommt. Das Ergebnis war ähnlich: die träge Masse und die schwere Masse der Körper finden mit größter Genauigkeit ihren Ausdruck in denselben Zahlen.

Newton hatte hierin nur ein zufälliges Zusammentreffen gesehen. Einstein hat hier den Schlüssel für den hermetisch verschlossenen, jungfräulichen Bergfried gesehen, in dem sich die Gravitation von der übrigen Natur abschloß.

Und zwar auf folgende Weise: Etwas ist merkwürdig an der Schwere, an der Gravitation: die Gegenstände mögen ihrer Art nach sein wie sie wollen, sie fallen immer mit derselben Geschwindigkeit (abgesehen vom Widerstand der Luft). Das läßt sich leicht feststellen, indem man in einer langen luftleer gemachten Röhre zu gleicher Zeit sehr verschiedene Gegenstände fallen läßt: sie gelangen alle zu gleicher Zeit unten in der Röhre an.

Eine Tonne Blei oder ein Blatt Papier, die man miteinander von einem Turm herunter ins Leere fallen läßt, erreichen den Boden gleichzeitig mit einer Geschwindigkeit, deren Beschleunigung 981 Zentimeter in der Sekunde beträgt.

Das ist eine schon Lukrez bekannte Tatsache. So schrieb vor 2000 Jahren der unsterbliche tiefe Dichter:

> ... Nulli, de nulla parte, neque ullo
> Tempore, inane potest vacuum subsistere rei,
> Quin sua quod natura petit concedere pergat.

Omnia quapropter debent per inane quietum
Aeque ponderibus non aequis concita ferri.*

Wenn die Schwere eine Kraft wäre ähnlich der elektrischen Anziehung, dem Zug einer Lokomotive oder auch der vorwärtstreibenden Kraft einer Pulverladung, so dürfte das nicht der Fall sein. Die Geschwindigkeiten, die sie Massen ganz verschiedener Art mitteilt, müßten ebenfalls verschieden sein. Die beiden verschiedenmassigen Züge in unserem eben verwendeten Beispiel erhalten ungleiche Beschleunigungen unter der Einwirkung derselben Lokomotive. Und doch, wenn sich plötzlich eine tiefe Grube unter ihnen auftäte, so würden sie mit derselben Geschwindigkeit hineinstürzen.

Von da an bis zu dem Gedanken, daß die Gravitation nicht eine Kraft ist, wie Newton wollte, sondern einfach eine Eigenschaft des Raums, in dem sich die Körper frei bewegen, ist nur ein Schritt. Einstein macht diesen Schritt ohne Zögern.

Denken wir uns in einem kolossalen Wolkenkratzer einen Aufzug, dessen Ankertau plötzlich bricht. Der Aufzug fällt mit beschleunigter Bewegung, jedoch weniger schnell als im leeren Raum, wegen des Widerstands der Luft und der Reibung an dem Schacht der Einrichtung. Aber denken wir uns überdies, daß die elektrische Maschine, die den Apparat betreibt, ihrem Umschalter eine entgegengesetzte Richtung gebe und den Fall so beschleunigt, daß die Fallgeschwindigkeit sich in jeder Sekunde um 981 Zentimeter steigert.

Wenn die Fahrgäste bei diesem schwindelerregenden Fall sich Kaltblütigkeit genug bewahrt haben, um zu beobachten, was vorgeht, so werden sie bemerken, daß ihre Füße den Boden des

* De Natura Rerum, Buch II, Vers 235—240.

Apparats nicht mehr drücken. Sie können sich plötzlich der reizenden dichterischen Prinzessin La Fontaines verwandt fühlen: »kein Gräschen hätte die Spur ihrer Schritte gefühlt«.

Die Geldbörsen unserer Fahrgäste, selbst die mit Gold gefüllten, drücken nicht mehr in ihren Taschen, — was sie einen Augenblick lang etwas aufregen mag. Wenn ihre Hüte ihren Händen entgleiten, so bleiben sie in der Luft schwebend neben ihnen. Haben sie sich mit einer Wage versehen, so können sie beobachten, daß die Schalen im Gleichgewicht bleiben, auch wenn man sehr verschiedene Gewichte darauf stellt. Und alles das, weil die Gegenstände auf den Boden fallen infolge der natürlichen Wirkung der Schwere mit derselben Geschwindigkeit wie der Aufzug selbst. Die Schwere ist daraus verschwunden.

Jules Verne hatte schon ähnliche Wirkungen beschrieben bei der Granate, die seine Helden von der Erde zum Mond trägt in dem Augenblick, da das romantische Geschoß am neutralen Punkt anlangt, an dem Ort, wo es aus der Anziehung der Erde heraustritt und derjenigen des Monds noch nicht verfällt. Der gute Jules Verne hat übrigens einige kleine wissenschaftliche Ketzereien begangen aus Anlaß dieser Granate. Besonders hat er vergessen, daß — kraft des Trägheitsprinzips selbst, und zwar kraft dessen, was man an ihm mit Händen greifen kann — die unglücklichen Reisenden gleich plattgedrückt wie Kuchen wären gegen den Treibspiegel der Granate hin, schon in dem Augenblick, da der Schuß losgeht. Auch war er sehr zu Unrecht der Meinung, die Gegenstände seien in der Granate erst in dem Augenblick nicht mehr schwer, da sie gerade zwischen den beiden Bereichen der Anziehung der Erde und der des Mondes schwebt.

Doch schenken wir dem Romanschriftsteller diese kleinen Ausstellungen und kommen wir auf das ausgezeichnete Bild zurück, mit dem er uns wie ein Prophet bedacht hat zur besseren Veranschaulichung unserer Einsteinschen Darlegung.

Betrachten wir also das Geschoß, wenn es frei gegen den Mond zu fallen beginnt.* Es ist klar, daß es von diesem Augenblick an, bis es gelandet oder vielmehr »gemondet« ist, sich genau so verhält wie unser Aufzug von vorhin.

Während dieses Sturzes gegen den Mond werden die Fahrgäste — die der fatalen Abplattung beim Abschuß durch ein Wunder entgangen sein sollen — alle Gegenstände um sich herum plötzlich ihres Gewichts entledigt und in der Luft schwebend sehen: unter dem Eindruck des geringsten Nasenstübers bleiben sie an den Wänden oder an der spitzbogigen Wölbung der Granate kleben. Sie selbst werden eine außerordentliche Leichtigkeit in sich fühlen und können ohne Mühe die wunderbarsten Sprünge machen, so daß ein Nijinski eifersüchtig werden könnte.

Der Grund ist, daß sie selbst und alle Gegenstände um sie herum mit derselben Geschwindigkeit gegen den Mond hinfallen wie die Granate. Daher kommt für sie das Verschwinden der Schwere, der Gravitation, die plötzlich verduften, wie wenn ein Zauberer sie berührt hätte. Der Zauberer ist die gehörig beschleunigte Bewegung, ist der freie Fall der Beobachter.

* Es versteht sich, daß wir eine Granate ohne Achsendrehung voraussetzen, das heißt, daß die Kanone von Kolumbia in unserer Hypothese keine gezogene Kanone sein darf. Diese genauere Bestimmung ist unumgänglich, denn wenn die Granate sich drehen würde, so würden Wirkungen der Zentrifugalkraft eintreten, welche die Erscheinungen und damit auch unsere Darlegungen noch verwickelter gestalten würden. Man wird wohl denken, das seien sie schon zur Genüge.

Um es zusammenzufassen: Um an einem beliebigen Ort die scheinbaren Wirkungen der Gravitation aufzuheben, genügt es, daß der Beobachter eine entsprechend beschleunigte Geschwindigkeit besitzt. Das heißt Einstein das »Prinzip der Äquivalenz«, der Gleichwertigkeit der Wirkungen der Schwere und derjenigen einer beschleunigten Bewegung.

Die beiden sind ununterscheidbar.

Denken wir uns unsere Jules Vernesche Granate und ihre unglücklichen Fahrgäste fortfliegend weit weg vom Mond, von der Erde, von der Sonne selbst, an einem jener öden eisigen Orte der Milchstraße, wo es keine Materie gibt, und so weit weg von allen Sternen, daß es weder Schwere noch Anziehungskraft gibt und daß unsere Granate unbewegt schweben bleibt. Bei dieser Lage der Dinge ist das klar; es gibt weder oben noch unten, noch auch Schwere für die Fahrgäste der Granate. Sie werden sich von allem Drum und Dran des Gewichts entledigt und befreit fühlen. Sie können sich nach Belieben aufrecht stellen auf die Innenwand des oberen Endes der Granate oder auf seinen Treibspiegel, wie das war, als sie gegen den Mond hin fielen.

Denken wir uns jetzt, daß der Zauberer Merlin verstohlenerweise dazukäme, daß er dann ein Seil an dem Außenring oben am Geschoß befestigte und dann daran zöge mit einer gleichförmig beschleunigten Bewegung. Was geht dann bei den Fahrgästen vor? Sie bemerken plötzlich, daß sie ihr Gewicht wiedergefunden haben, daß sie an den Boden der Granate gefesselt sind ungefähr wie vor ihrer Reise an den Boden unseres Erdplaneten. Ja, wenn die Bewegung des Zauberers Merlin sich zu 981 Zentimeter pro Sekunde beschleunigt, so werden sie genau dieselben Schwereempfindungen haben wie auf der Erde.

Sie werden bemerken, daß ein Teller, den sie in einem gegebenen Augenblick in die Luft warfen, auf den Boden fallen und dort zerbrechen wird. Sie werden denken: »Das geschieht, weil wir von neuem der Schwere unterliegen; dieser Teller fällt kraft seines Gewichts, seiner schweren Masse.« Aber der Zauberer Merlin wird seinerseits sagen: »Dieser Teller fällt, weil er kraft seiner Trägheit, seiner trägen Masse die Anstiegsgeschwindigkeit beibehalten hat, die er in dem Augenblick besaß, da man ihn geschleudert hat. Da ich die Granate mit beschleunigter Bewegung ziehe, so hat gleich darauf die wachsende Geschwindigkeit der Granate diejenige des geschleuderten Tellers übertroffen. Darum hat der Boden der Granate in ihrem beschleunigt ansteigenden Lauf den Teller getroffen und ihn zerbrochen.«

Das beweist, daß das Gewicht eines Körpers, seine Gravitation nicht von seiner Trägheit zu unterscheiden ist. Träge Masse, schwere Masse sind zwei Dinge, die nicht etwa nur infolge eines außerordentlichen zufälligen Zusammentreffens gleich sind, wie Newton meinte, die vielmehr völlig gleich und unzertrennlich sind. Diese beiden Dinge sind nur ein Ding.

Und damit werden wir auf den Gedanken geführt, daß die Gesetze der Schwere und die der Trägheit, die Gesetze der Gravitation und die der Mechanik identisch sein müssen oder wenigstens nur die verschiedene Seinsweise eines und desselben Wesens sein können. Ähnlich wie die Vorder- und die Seitenansicht eines und desselben Gesichts eben dieses Gesicht sind, nur unter zwei verschiedenen Winkeln gesehen.

Sogar wenn die Fahrgäste unserer Granate zum Licht- und Luftloch hinausschauen und das Seil sehen, das sie schleppt, so verschwindet ihre Wahnvorstellung doch nicht. Sie werden glauben, sie hängen unbeweglich, an einem Punkt des Raums, an

dem die Schwere wieder auftaucht; das heißt, wie die Fachleute sagen, an einem Punkt des Raums, in dem »ein Gravitationsfeld« besteht.

Diese Redeweise entspricht der geläufigen Wendung vom »magnetischen Feld«, was eine Gegend im Raum bedeutet, in der magnetische Wirkungen auftreten, wo der Magnetnadel eine bestimmte Richtung aufgezwungen wird.

Fassen wir zusammen: An jedem Ort kann man ein Gravitationsfeld, kann man die Wirkung der Schwere durch eine entsprechend beschleunigte Bewegung des Beobachters ersetzen und umgekehrt. Es gibt eine vollkommene Äquivalenz zwischen den Wirkungen der Schwere und denen einer entsprechenden Bewegung.

Damit sind wir in den Stand gesetzt, nun in höchst einfacher Weise jene grundlegende Tatsache festzustellen, von der man noch vor einigen Jahren keine Ahnung hatte, die aber durch Experimente glänzend nachgewiesen wurde. Das Licht pflanzt sich nicht geradlinig fort in den Teilen des Weltalls, wo die Gravitation herrscht, sondern seine Bahn ist gekrümmt wie die der schweren Gegenstände.

Wir haben im Lauf eines früheren Kapitels festgestellt, daß es in dem vierdimensionalen Kontinuum, in dem wir leben, das man Raumzeit nennen könnte und das wir einfacher Weltall heißen wollen, etwas gibt, das beständig bleibt und völlig gleich für Beobachter, die mit gegebenen verschiedenen Geschwindigkeiten ihren Ort verändern. Das ist das »Intervall« der Ereignisse.

Es ist natürlich, zu denken, daß dieses Intervall völlig gleich bleibt, selbst wenn die Geschwindigkeit des Beobachters sich

ändert, selbst wenn sie beschleunigt ist wie die unseres Aufzugs oder die Jules Vernesche Granate während ihres Falls.

Und in der Tat: wenn für zwei Beobachter, die mit verschiedenen Geschwindigkeiten ihren Ort verändern, etwas im Weltall »invariant« ist, wie die Physiker sagen, das heißt unveränderlich, so muß dieses Etwas natürlicherweise auch so bleiben für einen dritten Beobachter, dessen Geschwindigkeit allmählich von der des ersten zu der des zweiten übergeht und der folglich mit einer gleichförmig beschleunigten Geschwindigkeit ausgestattet ist.

Daraus lassen sich Folgerungen grundlegender Art ableiten.

Das eine versteht sich zunächst von selbst und wird von allen Physikern in ausnahmsloser Übereinstimmung angenommen: im leeren Raum nämlich und an einem Ort des Raums, an dem keine Kraft wirkt und wo es keine Schwere gibt, pflanzt sich das Licht geradlinig fort. Das ist gewiß aus vielen Gründen, zunächst schon der bloßen Symmetrie wegen, wenn in einer isotropen Gegend des leeren Raums ein Strahl, auf den nichts wirkt, von seinem geradlinigen Gang weder nach einer Richtung noch nach einer anderen abweichen kann. Das leuchtet ein, welche Hypothese man auch über das Wesen des Lichts annehme, selbst wenn man mit Newton voraussetzt, daß es aus schweren Partikeln gebildet ist.

Dies zugegeben, wollen wir nun annehmen, daß an einem Ort des Universums, wo Schwere herrscht, auf der Oberfläche des Monds zum Beispiel, ein wunderbares Gewehr eine Kugel abschießen könnte, welche die Geschwindigkeit des Lichts besitzt und auf der ganzen Länge ihrer Bahn beibehält.

Diese Kugel wird, wegen ihrer großen Geschwindigkeit, eine sehr straffe Bahn beschreiben, die trotzdem, wegen der Schwere, etwas gegen den Mondboden hin gekrümmt ist. Da wir im Feld

der Hypothesen nach Belieben pflücken dürfen, so hindert uns nichts an der Annahme, daß diese Kugel eine trassante Kugel ist, die ihre Bahn durch eine leichte Lichtspur zeichnet. Im großen Krieg hat man Kugeln dieser Art kennenlernen können.

Diese Kugel fällt im Vorwärtsfliegen in jeder Sekunde gegen den Boden des Monds mit einem Betrag, der dem gleich ist, um den jedes andere Geschoß fallen würde, das mit einer ganz beliebigen Geschwindigkeit fliegen würde oder auch mit gar keiner Geschwindigkeit. Alle Gegenstände in der Nähe der Oberfläche des Bodens fallen — im leeren Raum — mit derselben senkrechten Geschwindigkeit, die unabhängig ist von ihrer Lageänderung in wagrechter Richtung. Aus diesem Grunde sind die Geschoßbahnen um so mehr gekrümmt, eine je schwächere Anfangsgeschwindigkeit sie haben.

Beobachtet durch die Licht- und Luftlöcher der Jules Verneschen Granate (die im selben Augenblick frei gegen den Mond fallen soll), wird die Bahn dieses Geschosses den Fahrgästen als gerade Linie erscheinen, weil sie mit derselben Geschwindigkeit fällt wie die Fahrgäste.

Nehmen wir an, daß ein Lichtstrahl von der Mündung des Gewehrs her von diesem zugleich mit der Kugel abgeht, neben ihr her, in derselben Richtung. Dieser Lichtstrahl wird offenbar geradlinig sein für die Fahrgäste der Granate, da das Licht sich geradlinig fortpflanzt, wo es keine Schwere gibt. Folglich, da er dieselbe Form, dieselbe Richtung, dieselbe Geschwindigkeit hat wie die Raketenkugel, wird dieser Lichtstrahl für die Augen der Fahrgäste auf seinem ganzen Weg mit der Bahn dieser Kugel zusammenfallen.

Auch das folgt daraus, daß das »Intervall« (das zeitliche wie das räumliche) des Lichtstrahls und der Kugel gleich Null ist und

bleibt. Nun muß dieses Intervall so bleiben, die Geschwindigkeit des Beobachters mag sein, welche sie will. Wenn also die Jules Vernesche Granate nicht mehr fällt, sondern auf der Oberfläche des Mondes festliegt, so werden ihre Fahrgäste doch noch den Lichtstrahl in jedem seiner Punkte mit der Bahn des Geschosses zusammenfallen sehen. Diese Bahn — das bemerken sie jetzt — ist durch die Schwere gekrümmt: also ist der Lichtstrahl gleichermaßen durch sie gekrümmt.

Das beweist, daß das Licht sich nicht geradlinig fortpflanzt, sondern genau wie alle Gegenstände fällt unter dem Einfluß der Gravitation.

Wenn man das bis jetzt noch nie festgestellt hat, wenn man immer geglaubt hat, das Licht pflanze sich geradlinig fort, so ist der Grund der, daß seine Bahn infolge seiner ungeheuren Geschwindigkeit durch die Schwere nur sehr wenig gekrümmt ist.

Das ist verständlich. An der Oberfläche der Erde zum Beispiel muß das Licht, wie alle Gegenstände, mit einer Geschwindigkeit fallen, die nach einer Sekunde = 981 Zentimeter ist. Nach Verlauf einer Sekunde aber hat ein Lichtstrahl schon 300 000 Kilometer zurückgelegt. Nehmen wir an (es ist ja eine starke Übertreibung), man könne in der Nähe der Oberfläche der Erde einen horizontalen 300 Kilometer langen Lichtstrahl beobachten. Während der tausendstel Sekunde, die der Lichtstrahl braucht, um von einem Beobachter zum anderen zu gelangen, wird er bloß um einen Betrag fallen, der gleich fünf Tausendteilen eines Millimeters ist.

Man versteht, daß ein Lichtstrahl, der auf eine Entfernung von 300 Kilometer hin sich von seiner Anfangsrichtung nur um diesen Betrag, der in keiner Weise zu beobachten ist, entfernt, immer als geradlinig angesehen worden ist.

Gibt es nun kein Mittel, durch Experiment festzustellen, ob das Licht durch die Gravitation gekrümmt wird oder nicht?

Dieses Mittel gibt es; die Astronomie wird es uns an die Hand geben.

Wenn es unmöglich ist, die Krümmung eines Lichtstrahls, der von einem Punkt der Erdoberfläche zum anderen geht, abzuschätzen, so ist der nächstliegende Grund der, daß die Schwere auf der Erde zu gering ist, um diesen Strahl stark zu biegen; ein weiterer Grund ist, daß wir ihn nicht weit genug verfolgen können, da unser Planet lächerlich klein ist.

Was man aber nicht tun kann auf diesem kleinen Erdkügelchen, dessen ganzen Durchmesser das rasche Licht in einer fünfundzwanzigstel Sekunde durchmißt, das kann man vielleicht in dem Riesenlaboratorium der himmlischen Räume verwirklichen. Nun haben wir, fast in Reichweite für unsere Hände — bloß 150 Millionen Kilometer von hier — ein Gestirn, auf dem die Schwere 27mal intensiver ist als hienieden. Das ist die Sonne. Ein sich selbst überlassener Körper fällt dort in der ersten Sekunde 132 Meter. Sein Fall ist 27mal schneller als auf der Erde.

Das Licht wird also in der Nähe der Sonne weit mehr gebeugt werden durch die Schwere. Diese Beugung wird noch größer sein in Anbetracht der Tatsache, daß die Sonne einen Durchmesser von $1^1/_2$ Millionen Kilometer hat und daß ein Lichtstrahl viel mehr Zeit zum Durchlaufen dieser Strecke braucht als zum Durchlaufen des Durchmessers der Erde. Die Wirkung der Schwere auf diesen Strahl dauert viel länger an als die auf einen Strahl, der neben der Erde hergeht, sie wird ihn darum auch mehr krümmen.

Gesetzt, ein Lichtstrahl komme zum Beispiel von einem sehr weit hinter der Sonne gelegenen Stern. Wenn er zu uns kommt, nachdem er diese gestreift hat, so wird er sich wie ein Geschoß verhalten. Seine Bahn ist nicht mehr geradlinig, sie ist gegen die Sonne hin leicht gekrümmt. Mit anderen Worten, dieser Strahl ist von der geraden Linie abgelenkt, und seine Richtung ist, wenn ihn unsere Augen auf der Erde aufnehmen, etwas verschieden von der Richtung, die er hatte, als er von dem Stern abging. Er hat eine Ablenkung erfahren.

Die Berechnung zeigt, daß diese Ablenkung, so schwach sie ist, doch meßbar ist. Sie ist gleich einem Winkel von $1^3/_4$ Sekunden, den die genauen Methoden der Astronomen noch zu messen erlauben.

Ja freilich, so sehr groß ist er eben nicht, dieser Winkel. Man urteile selbst: man muß 324 000 Winkel von einer Sekunde zusammensetzen, um einen rechten Winkel zu bekommen. Mit anderen Worten, ein Winkel von einer Sekunde ist derjenige, unter dem man bei einer Entfernung von 206 Kilometer die zwei Enden eines 1 Meter langen Pfahls sähe, den man in den Boden gesteckt hat. Wären unsere Augen scharf genug, um einen Mann von durchschnittlicher Größe aufrecht stehend zu sehen 200 Kilometer entfernt von unserem Standort, so würde unser Blick, wenn er von seinem Kopf zu seinen Füßen herabgleitet, sich um einen sehr geringen Winkel verschieben.

So winzig dieser Winkel ist, die Astronomen verstehen es doch, ihn zu bestimmen, dank der ungemein feinen Genauigkeit ihrer Methoden. Man darf ihn nicht verachten, diesen minimalen Winkel. Man soll nicht auf die herabsehen, die an der Beobachtung solcher Geringfügigkeiten herumgrübeln, weil heute die Wissenschaft durch solche Dinge umgewälzt worden ist. Einstein hat gegen Newton recht bekommen, weil man diesen so

kleinen Winkel zu messen vermochte, weil diese Ablenkung tatsächlich festgestellt worden ist.

Gegen die Feststellung ihres Vorhandenseins erhob sich allerdings eine gewaltige Schwierigkeit.

Wie soll man einen Strahl wahrnehmen können, der uns von einem Stern am Rand der Sonne vorbei zukommt, das heißt am hellen Tag? Das ist unmöglich. Selbst für die kräftigsten Ferngläser sind die Bilder der im Hintergrund der Sonne gelegenen Sterne vollkommen verschwommen im Glanz der Sonne oder — genauer gesagt — in dem durch unsere Atmosphäre zerstreuten Licht.

Man darf bei dieser Gelegenheit wohl bemerken (wenn man schon wieder etwas in der Einschaltung sagen darf; warum aber auch nicht?), daß wir von der Nacht viel mehr über die Geheimnisse des Weltalls erfahren haben als vom Tag. In der literarischen, auch in der politischen Symbolsprache ist das Tageslicht das Sinnbild für den Fortschritt und das Wissen, die Nacht das Abzeichen der Unwissenheit. Welche Torheit! Das ist eine Lästerung der Nacht, deren sanfte Dämmerung wir verehren sollten. Und zwar rede ich hier nicht von ihren romantischen Reizen, sondern nur von den wunderbaren Fortschritten, die wir ihr in der Wissenschaft verdanken.

Mitternacht ist nicht bloß die Stunde der Verbrechen. Es ist auch die Stunde für die erstaunlichen Flüge zu fernen Welten. Bei Tag sieht man nur e i n e Sonne; die Nacht zeigt uns Millionen Sonnen. Und wenn auch der blendende Vorhang, den das Sonnenlicht vor dem Himmel ausbreitet, aus funkelnden Strahlen gewebt ist, ein Vorhang ist es doch; denn er versetzt uns in die Lage der Nachtfalter, die ein allzu grelles Licht verhindert, weiter zu sehen, als ihre Flügel reichen.

Wir müssen also, um unser Problem zu lösen, mitten in der Nacht Sterne sehen, deren Bild am Sonnenrand sein müßte. Ist das denn unmöglich? Nein. Die Natur hat hier Vorsorge getroffen, indem sie totale Sonnenfinsternisse schuf, die ab und zu an gewissen Orten der Erde sichtbar sind.

Da ist nun einige Minuten lang die strahlende Scheibe vollkommen verdeckt hinter der des Monds, und zwar so, daß mitten am Tag alles so ist, wie wenn es Nacht wäre, und daß man die Sterne neben der schwarz verlarvten Sonne glänzen sieht.

Nun sollte gerade eben am 29. Mai 1919 eine totale Sonnenfinsternis in Afrika und Südamerika sichtbar sein, kurze Zeit nachdem Einstein, mittels einer der hier wiedergegebenen entsprechenden Schlußfolgerungen, die Ablenkung der Sternstrahlen in der Nähe der Sonne vorausgesagt hatte. Es wurden nun zwei Forschungsunternehmungen veranstaltet von den Astronomen von Greenwich und von Oxford. Die eine richtete sich in Sobral in Brasilien ein, die andere auf der kleinen portugiesischen Insel Principe im Golf von Guinea.

Einige der englischen Astronomen sahen dem Ergebnis mit einigem Zweifel entgegen. Wie sollte man auch annehmen, bis zum Erweis des Gegenteils, daß Newton sich getäuscht oder daß er wenigstens kein vollkommenes Gesetz aufgestellt hatte? Und doch ergab sich dieser Beweis des Gegenteils — und zwar auf schlagende Art — aus den Beobachtungen, die man machte.

Diese bestanden darin, daß man während der paar Minuten der totalen Sonnenfinsternis auf eine gewisse Zahl von Platten die der verdeckten Sonne benachbarten Sterne photographierte. Sie waren mit denselben Ferngläsern einige Wochen vorher photographiert worden zu einer Zeit, da die Himmelsgegend, in

der sie leuchten, noch in der Nacht und fern von der Sonne war. Diese durchläuft bekanntlich in ihrem jährlichen Lauf nach und nach die verschiedenen Sternbilder des Tierkreises.

Wenn das Licht der photographierten Sterne bei seinem Durchgang an der Sonne vorbei nicht abgelenkt war, so ist klar, daß ihre Abstände völlig gleich sein mußten auf den während der Sonnenfinsternis gebrauchten und auf den einige Zeit vorher nachts gebrauchten Platten.

Wurde aber ihr Licht während der Sonnenfinsternis durch die Anziehung der Sonne abgelenkt, so mußte es ganz anders sein. Und zwar aus folgendem Grund. Wenn der Mond über einer unserer Ebenen aufgeht, so ist er nicht rund, wie jedermann schon bemerkt hat, sondern in senkrechter Richtung abgeplattet und gleicht einer auf dem Horizont liegenden riesenhaften Zwergapfelsine. Und trotzdem hat der Mond nicht aufgehört, rund zu sein. Wenn er abgeplattet scheint, so ist der Grund, daß die von seinem unteren Rand kommenden Strahlen, die uns zukommen, nachdem sie eine sehr dichte Luftschicht durchlaufen haben, gegen den Boden hin gekrümmt sind infolge der Brechung dieser Luftschicht, und viel mehr als die Strahlen des oberen Rands, die eine minder dichte Atmosphäre durchlaufen. Unser Auge sieht den Mondrand in der Richtung, in der uns die Strahlen zukommen und nicht in der, von der sie herkommen. Darum erscheint uns der untere Rand des Monds höher über den Horizont gehoben, als es in Wirklichkeit der Fall ist. Diese Ablenkung kommt von der Brechung her.

In ähnlicher Weise wird uns ein Stern, der etwas östlich von der Sonne liegt (und dessen Licht nicht durch die Brechung, sondern durch die Schwere gekrümmt ist), etwas weiter entfernt von ihr erscheinen. Er wird uns weiter nach Osten zu liegen scheinen,

als es in Wirklichkeit der Fall ist. Ebenso wird uns ein westlich von der Sonne gelegener Stern nach Westen zu vom westlichen Sonnenrand weggerückt scheinen.

So werden also die auf beiden Seiten der Sonne liegenden Sterne weiter entfernt, weiter auseinandergerückt erscheinen auf den während der Sonnenfinsternis aufgenommenen Klischees. In ihrer regelmäßigen Stellung, auf den während der Nacht aufgenommenen Klischees, werden sie dagegen mehr zusammengedrängt, mehr einander angenähert scheinen.

Und nun hat man gerade das festgestellt in der mikrometrischen Untersuchung der in Sobral und Principe aufgenommenen Photographien. Nicht nur die Ablenkung des Lichts der Sterne durch die Sonne ist so erwiesen worden, man hat auch festgestellt, daß diese Ablenkung genau dem von Einstein angekündigten zahlenmäßigen Betrag entsprochen hat. Sie entspricht einem Winkel von 1¾ Sekunde (1″ 75) für einen den Sonnenrand streifenden Stern, ein Winkel, der verhältnismäßig sehr schnell abnimmt für Sterne, die von diesem Rand weiter entfernt sind.

Glorreicher Triumph der Theorie, die zum erstenmal ein Band knüpfte zwischen dem Licht und der Gravitation!

Ich habe oben die Krümmung des Lichts durch die Schwere mit der durch die atmosphärische Strahlenbrechung hervorgerufenen verglichen. Und wirklich haben manche Astronomen sich gefragt, ob die Übereinstimmung der Theorie Einsteins mit den während der Sonnenfinsternis erzielten Ergebnissen nicht doch vielleicht nur ein zufälliges Zusammentreffen sei und ob die beobachteten Ablenkungen nicht von einer in der Sonnenatmosphäre bewirkten Brechung herrühren.

Diese Erklärung scheint unhaltbar zu sein. Man beobachtet manchmal Kometen, die den Raum ganz nahe an der Sonnen-

oberfläche durchlaufen. Sie würden in ihrer Bewegung einen Widerstand erleiden, der sie vollkommen stören würde, wenn die Sonne eine Atmosphäre hätte, die so stark strahlenbrechend wäre, daß sie die in Sobral und Principe beobachteten Ablenkungen erklären könnte. Solche Störungen in den Kometenbahnen in der Nähe der Sonne sind noch nie festgestellt worden. Das schließt jede andere Erklärung aus als die durch eine Wirkung der Schwere auf das Licht.

So haben die Strahlen der Sterne, die mit Methoden von erlesener Feinheit gemessen wurden, eine schlagende Bestätigung der theoretischen Vordersätze Einsteins ergeben.

6

Neue Auffassung der Gravitation

Geometrie und Wirklichkeit • Die Geometrie Euklids und die anderen Geometrien • Kontingenz des Kriteriums Poincarés • Das wirkliche Weltall ist nicht euklidisch, sondern riemannisch • Die Verwandlungen der Zahl π • Der Gesichtspunkt des Betrunkenen • Gerade und geodätische Linien • Das neue Gesetz der allgemeinen Anziehung • Die Regelwidrigkeit des Planeten Merkur erklärt • Gravitationstheorie Einsteins

Entspricht das Weltall der Geometrie? Das ist eine Frage, über die Philosophen und Gelehrte viel gestritten haben. Wir werden nun angesichts der Ablenkung des Lichts durch die Schwere leicht in der Lage sein, sie in Angriff zu nehmen.

Man lehrt eine stattliche Reihe von geometrischen Lehrsätzen, die fest ineinandergefügt sind und von denen die bedeutendsten ehedem von einem großen griechischen Genius geschaffen wurden. Darum heißt diese klassische Geometrie die Euklidische.

Diese Lehrsätze ruhen auf einer gewissen Zahl von Axiomen und Postulaten, die im Grunde nichts als Behauptungen, nichts als Begriffsbestimmungen sind.

Die wichtigste dieser Begriffsbestimmungen ist die folgende: Die gerade Linie ist die kürzeste Verbindung zweier Punkte. Das kommt jedem Schüler höchst einfach vor, weil er weiß, daß der Läufer in der Rennbahn, der sich einfallen läßt, im Zickzack zu

laufen, nach den anderen am Ziel anlangt; und wenn man oft auf den Sportsplatz geht, so hat man weder Lust noch Muße, sich über die Gültigkeit der geometrischen Axiome den Kopf zu zerbrechen. Was bedeutet eigentlich diese Bestimmung des Begriffs der geraden Linie? Man hat lange darüber gestritten, und Poincaré hat einige tief- und feindurchdachte Seiten darüber geschrieben; aber das, worauf es hinauskommt, scheint doch nicht so ganz festzustehen.

In der Praxis weiß jeder von uns sehr wohl, was man eine gerade Linie heißt. Die Linie, in der die Kante eines gut geglätteten Lineals erscheint. Woher weiß man, daß ein Lineal gut geglättet ist? Indem man es vor das Auge bringt und beobachtet, daß seine beiden Endpunkte beim Zielen sich decken für den Blick, der zugleich alle dazwischenliegenden Punkte der Kante sieht. Danach urteilen die Tischler, ob ein Brett gut gehobelt ist. Mit einem Wort: Gerade Linie heißen wir in der Praxis diejenige, der der Blick des Zielenden folgt, zwischen Visier und Korn.

Das alles kommt im Grunde darauf hinaus, die Gerade durch die Richtung eines Lichtstrahls zu bestimmen.

Wie man auch die Sache dreht und wendet, man kommt immer darauf hinaus: Die Behauptung, die Kante eines Gegenstands sei gerade, ist gleich der Behauptung, daß die sie begrenzende Linie ihrer ganzen Länge nach mit einem Lichtstrahl zusammenfällt.* Man kann also behaupten, praktisch ist die gerade Linie der vom Licht in einem homogenen Medium durchlaufene Weg.

Nun erhebt sich aber eine Frage. Ist die Welt, in der wir leben,

* Vorausgesetzt ist bei alledem natürlich immer, daß der Lichtstrahl sich in einem homogenen Medium fortpflanzt.

ist das Weltall in Übereinstimmung mit der Euklidischen Geometrie, ist es euklidisch, um ein neuerdings beliebtes Eigenschaftswort zu brauchen?

Denn man muß endlich einmal sagen, daß die Geometrie Euklids nicht die einzige ist, die man geschaffen hat. Im 19. Jahrhundert haben tiefe und kühne Gelehrte, wie Riemann, Bolyay, Lobatschewsky und Poincaré ganz andere, sehr merkwürdige neue Geometrien begründet. Sie sind ebenso logisch und zusammenhängend wie die klassische Geometrie Euklids, aber sie beruhen auf anderen Axiomen und Postulaten, das heißt auf anderen Begriffsbestimmungen.

So heißt man zum Beispiel Parallelen zwei in derselben Ebene liegende Linien, die sich nie treffen. Die unserer Kindheit vertraute Geometrie sagt: Durch einen Punkt kann man nur eine einzige Parallele zu einer gegebenen Geraden ziehen. Das heißt man das Euklidische Postulat. Da kommt Riemann, der dieses Postulat nicht zugibt und es durch folgendes ersetzt: Durch einen Punkt kann man keine parallele Gerade zu einer gegebenen Geraden ziehen, das heißt keine Linie, die diese Gerade nie schneidet. Und darauf gründet er eine sehr gut zusammenhängende Geometrie.

Wer wagt zu behaupten, daß die Geometrie Euklids wahr ist, die Riemanns falsch? Als ideale theoretische Gedankenbauten sind beide gleich wahr.

Man kann nun folgende Frage stellen: Entspricht die wirkliche Welt der klassischen Geometrie Euklids oder derjenigen Riemanns?

Lange war man der Meinung, sie entspreche der Geometrie Euklids. Poincaré selbst sagt von ihr: »Diese Anschauung ist und

bleibt die bequemste: 1. weil sie die einfachste ist; 2. weil sie sich recht gut mit den Eigenschaften der festen, natürlichen Körper verträgt, jener Körper, denen unsere Glieder und unser Auge am nächsten kommen und mit denen wir unsere Meßwerkzeuge machen.«

Als die Alten behaupteten, die Erde sei flach, versicherten sie ebenso oder ungefähr ebenso: »Diese Anschauung ist die bequemste: 1. weil sie die einfachste ist; 2. weil sie sich recht gut mit den Eigenschaften der natürlichen Gegenstände verträgt, mit denen wir in Berührung sind.« Aber als die Menschen mit ferneren Gegenständen in Berührung kamen, als Seefahrer und Astronomen noch viel mehr solche neuen Gegenstände aufzeigten, da hörte die Anschauung von der flachen Erde auf, die bequemste, die einfachste, die dem sinnenfällig Gegebenen am besten angepaßte zu sein. Und da tauchte die Anschauung von der runden Gestalt der Erde auf, die sich als unendlich viel bequemer, einfacher, der Außenwelt besser angepaßt erwies.

Die »Bequemlichkeit«, die für Poincaré der Maßstab der wissenschaftlichen Wahrheit ist, ist etwas Zufälliges und Dehnbares. Dieser und jener Gesichtspunkt mag in Berlin bequem sein, ist es aber schon nicht mehr in Potsdam. Diese und jene Theorie mag bequem sein für einen Bereich von 100 Meter, ist es aber nicht mehr für einen solchen von 100 Millionen Kilometer.

Die Hypothese einer flachen Erde hat der einer runden Erde Platz machen müssen. Die unbewegliche Erde hat der rotierenden Erde Platz machen müssen. Ebenso scheint heute die Euklidische Geometrie einer anderen weichen zu müssen als einer bequemen Darstellung der wirklichen Welt.

Kann man im Weltall, in unserem wirklichen Raum, eine Parallele zu einer Geraden ziehen? Das heißt: ist es möglich,

daß zwei wirkliche Geraden, die in derselben Ebene liegen, sich nie schneiden? Diese Frage kommt auf folgendes hinaus: Ist es möglich, daß zwei Lichtstrahlen, die den leeren Raum durchwandern, in dem Bereich, den wir (für jeden Bruchteil dieser Strahlen) dieselbe Ebene heißen, sich niemals schneiden? Die Antwort auf diese Frage lautet: Nein.

Da diese beiden Lichtstrahlen im Himmelsraum durch die Gravitation der Sterne abgelenkt werden, da sie ferner in ungleicher Weise abgelenkt werden, da ihr Abstand von diesen Gestirnen verschieden ist, so folgt notwendig, daß sie nicht mehr parallel sind (im euklidischen Sinn des Worts) und daß sie sich schließlich schneiden oder auch, daß sie nicht mehr die erste Bedingung der Parallelität erfüllen: das Beieinandersein in derselben Raumebene.

Mit einem Wort: das wirkliche Weltall ist nicht euklidisch, vorausgesetzt, daß man es nicht mehr in dem lächerlich beschränkten Bereich unserer Laboratoriumsversuche betrachtet, sondern in dem weiten Feld der Himmelsräume, und zwar weil das Licht sich darin nicht in gerader Linie fortpflanzt.

Kant betrachtete diese Wahrheiten, oder besser gesagt, diese deduktiven Behauptungen der Euklidischen Geometrie, als »synthetische Urteile a priori«, als einleuchtende, auf nichts als sich selbst beruhende Wahrheiten. Wir haben oben gesehen, daß Kant sich hier getäuscht hat, nicht bloß vom Gesichtspunkt der theoretischen, sondern auch von dem der wirklichen Geometrie aus. Schon die Abstammung des Worts »Geometrie«, das Erdmessung bedeutet, genügt im übrigen, um zu zeigen, daß sie ursprünglich und vor allem eine praktische Wissenschaft war. Das ist eine genügende Rechtfertigung für die hier gestellte Frage, mit welcher Geometrie das wirkliche Weltall in Übereinstimmung ist.

Gauß, jener tiefe deutsche Geist, hat sich diese Frage auch schon vorgelegt, und er hat im vorigen Jahrhundert genaue Versuche angestellt, um zu ermitteln, ob die Summe der Winkel eines Dreiecks gleich zwei Rechten ist, wie es die Euklidische Geometrie behauptet. Zu diesem Zweck bildete er ein ungeheures Dreieck, dessen Ecken durch die Gipfelpunkte dreier entfernter Berge bestimmt waren. Einer von ihnen war der berühmte Brocken. Er visierte gleichzeitig mit seinem Gehilfen von jedem dieser Gipfel nach den beiden anderen. Er fand, daß die Summe der drei Winkel des Dreiecks sich von 180 Grad nur um den Betrag unterschied, der den Beobachtungsfehlern entspricht.

Viele Böotier und einige Philosophen machten sich recht lustig über diese Versuche und über Gauß. Sie erklärten mit der apriorischen Unbedingtheit, die man manchmal bei diesen und jenen trifft, daß die Messungen, selbst wenn sie ein anderes Ergebnis gehabt hätten, nichts gegen die Euklidischen Lehrsätze bewiesen, sondern höchstens dargetan hätten, daß irgendeine störende Ursache die Lichtstrahlen zwischen den drei Dreiecksspitzen krümmte. Das ist richtig; aber das besagt nichts.

Wenn Gauß gefunden hätte, daß die Summe der Winkel des untersuchten Dreiecks größer war als zwei Rechte, so hätte das bewiesen, daß die wirkliche Geometrie nicht diejenige Euklids ist. Die Frage, die sich Gauß stellte, ist sehr tief und sinnvoll. Den Böotiern und den paar Philosophen, die Gauß verhöhnten, hätte man die Pistole auf die Brust setzen können mit der Forderung, sie sollen einmal die wirklichen geraden Linien, die geraden Linien in der Natur anders definieren als durch die Bahnen des Lichts.

Wenn Gauß nicht fand, daß die Summe der Winkel sich von zwei Rechten unterscheidet, so war der Grund, daß seine Maße zu

ungenau waren. Wären sie viel genauer gewesen, hätte er an einem größeren Dreieck arbeiten können, etwa mit der Erde, dem Jupiter in Opposition und einem anderen Planeten als Ecken, so hätte er einen bemerkenswerten Unterschied gefunden.

Das wirkliche Weltall ist also nicht euklidisch. Es ist ungefähr euklidisch nur in den Bereichen des Raums, wo das Licht sich geradlinig fortpflanzt, das heißt an Orten, die sehr weit entfernt sind von jeder gravitierenden Masse, wie zum Beispiel dem, an welchem wir oben die Jules Vernesche Granate verlassen haben.

Noch viele andere Gründe bewirken, daß infolge der Gravitation das Weltall der Euklidischen Geometrie nicht entspricht.

Beispiel: In dieser Geometrie steht die Länge des Kreisumfangs mit dem Durchmesser in einem gewissen wohlbekannten Verhältnis, das durch den griechischen Buchstaben π bezeichnet wird. Dieses Verhältnis, das ausdrückt, wievielmal der Durchmesser in dem Kreisumfang enthalten ist, ist gleich 3,14159265... und so weiter. Ich breche ab; denn π hat eine unendliche Zahl von Dezimalen. Nun ist die Frage: Ist in der Praxis das Verhältnis der Kreisumfänge zu den Durchmessern wirklich gleich dem klassischen Wert π? Hat zum Beispiel das Verhältnis des Kreisumfangs der Erde* zu ihrem Durchmesser genau diesen Wert? Nach Einstein ist die Antwort: Nein; was er folgendermaßen beweist. Denken wir uns, daß zwei Geodäten, zwei sehr geschickte, sehr rasche, ja etwas hexenkünstlerische Feldmesser sich vornehmen, den Kreisumfang und den Durchmesser der Erde am Äquator zu messen. Sie sind mit völlig gleichen, in Grade eingeteilten Maßstäben versehen. Sie beginnen ihre Messungen

* Wir setzen hier natürlich die Erde als vollkommen kreisförmig und frei von Unebenheiten voraus.

gleichzeitig, indem sie vom selben Punkt des Äquators ausgehen. Nur wendet sich der eine nach Westen, der andere nach Osten; ihre Geschwindigkeiten sind gleich, und zwar derart, daß der nach Westen gehende die Umdrehung der Erde gewissermaßen aufhebt und die Sonne den ganzen Tag unbeweglich in derselben Höhe über dem Horizont sieht. So sieht man ja manchmal in den Varietétheatern einen Tausendkünstler, der auf einer bewegten Kugel geht und doch immer auf dem obersten Punkt der Kugel bleibt, weil die Geschwindigkeit seiner Schritte genau gleich der Verschiebung der Kugeloberfläche ist, nur in entgegengesetzter Richtung.

Ein unbewegter Beobachter im Raum, zum Beispiel auf der Sonne, wird also denjenigen unserer Feldmesser, der sich nach Westen wendet, unbewegt sich gegenüber sehen. Dagegen wird ihm derjenige, der nach Osten geht, einen Rundgang um die Erde zu machen scheinen, und zwar doppelt so schnell, als wenn er an seinem Ausgangspunkt stehen geblieben wäre.

Wenn nun unsere zwei Feldmesser mit derselben Geschwindigkeit, jeder in seiner Richtung, die Erde rundherum ausgemessen haben, werden sie dann dieselbe Länge gefunden haben? Offenbar nicht. Denn — der Oberaufseher auf der Sonne kann das feststellen — das Metermaß des Feldmessers, der nach Osten geht, ist durch seine Geschwindigkeit verkürzt worden, kraft der Fitzgerald-Lorentzschen Verkürzung, wie wir gezeigt haben. Dagegen unterliegt der Metermaßstab des Feldmessers, der nach Westen geht, dieser Verkürzung nicht, wie das der Oberaufseher auf der Sonne feststellen kann, relativ zu dem er unbewegt ist.

Folglich finden die beiden Feldmesser für den Erddurchmesser verschiedene Zahlen, und zwar findet derjenige, der sich nach Westen wendet, eine geringere Meterzahl als der andere. Ander-

seits ist einleuchtend, daß unsere beiden Beobachter für diesen Durchmesser völlig gleiche Werte finden, wenn sie ihn dann messen, indem sie ihn mit derselben Geschwindigkeit durchlaufen.

Die Zahl π, welche nach den angestellten Messungen das Verhältnis des Erdumfangs zum Erddurchmesser ausdrückt, ist also verschieden, je nachdem man im Sinne der Erdumdrehung geht oder umgekehrt. Da die wirklichen Werte der Zahl π verschieden sind, so können sie also nicht gleich der ein für allemal feststehenden einen Zahl der klassischen Geometrie sein. Also entspricht das wirkliche Weltall dieser Geometrie nicht.

Diese Unterschiede rühren, in dem eben behandelten Fall, von dem Umstand her, daß die Erde sich dreht. Vom Gesichtspunkt der Gravitation aus hat die Umdrehung der Erde zentrifugale Wirkungen, welche die zentripetale Wirkung der Schwere abschwächen. Übrigens haben wir eben gesehen, daß für denjenigen unserer Feldmesser, dessen Geschwindigkeit die Erdumdrehung aufhebt, der Wert der Zahl π geringer ist als für den Beobachter, dessen Geschwindigkeit diese Umdrehung zu verdoppeln scheint. Da die Wirkungen der Schwere im umgekehrten Verhältnis zu denen der Umdrehung, der Zentrifugalkraft stehen, so folgt also (und der Beweis dafür ist ebenso einfach wie der vorhergehende), daß es die Wirkung der Schwere ist, der Zahl π einen im Verhältnis zu ihrem klassischen Wert geringeren Wert zu geben.

Mit einem Wort, im Weltall haben die um gravitierende Massen und Gestirne gezogenen wirklichen Kreisumfänge im Verhältnis zu ihrem Durchmesser eine geringere Länge als in der Euklidischen Geometrie.

Der Unterschied ist im übrigen im allgemeinen ziemlich schwach. Aber er ist nicht gleich Null. Wenn man eine Masse von 1000 Kilo-

gramm in den Mittelpunkt eines Kreises von 10 Meter Durchmesser legt, so wird die Zahl π in Wirklichkeit von ihrem euklidischen Wert um weniger als ein Septillionstel abweichen, das heißt um weniger als ein Millionstel des Milliardstel eines Milliardstel (geschrieben mit 42 Nullen).

In der Nähe von ungeheuren Massen, wie es die Gestirne sind, kann der Unterschied viel größer sein, wie wir sehen werden. Daher vor allem kommen die Abweichungen des Newtonschen Gravitationsgesetzes von dem Einsteinschen, Abweichungen, in betreff deren die Beobachtung zugunsten des letzteren entschieden hat. Aber greifen wir nicht vor!

Wir haben in einem früheren Kapitel gezeigt, daß das wirkliche Weltall der Relativisten ein vierdimensionales Kontinuum ist und nicht ein dreidimensionales, wie die klassische Wissenschaft meinte, und daß im Schoß dieses Kontinuums die Abstände im Raum und die in der Zeit relativ sind. Einen Wert, der unabhängig ist von den Bedingungen der Beobachtung, eine absolute — oder wenigstens objektive Wirklichkeit hat einzig und allein, was wir das Intervall der Ereignisse, diese Synthese der räumlichen und zeitlichen Daten genannt haben.

Aber wenn das Weltall, so wie wir es behandelt haben aus Anlaß des Michelsonschen Versuchs und der damit zusammenhängenden speziellen Relativität, auch seine vier Dimensionen hat, so blieb es darum nicht weniger ein euklidisches Kontinuum, in dem die klassische Geometrie ihre Bestätigung fand, in dem das Licht sich geradlinig fortpflanzte.

Aber wir müssen klein beigeben; wir haben es eben gesehen. Nicht nur ist es vierdimensional; es ist auch nicht euklidisch.

Mit welcher Geometrie läßt sich dieses Weltall am besten und,

um mit Poincaré zu reden, am bequemsten vereinbaren? Wahrscheinlich mit der von Riemann. Wenn man auf einem auf den Tisch gebreiteten Blatt Papier einen kleinen Kreis mit Hilfe eines Zirkels zieht, so ist der Radius dieses Kreises durch die Entfernung der Zirkelspitzen gegeben, und dieser Kreis ist euklidisch. Aber wenn man diesen Kreis auf ein Ei zeichnet, so daß die feste Spitze des Zirkels oben auf dem Ei eingesetzt wird, und wenn der Radius wieder durch die Entfernung der Spitzen gegeben ist, so ist der gezeichnete Kreis nicht euklidisch. Das Verhältnis der gezeichneten Peripherie zu dem so definierten Radius ist kleiner als π, genau wie es kleiner als π ist, wenn der Kreis um ein massives Gestirn beschrieben wird.

Nun gut! Es besteht derselbe Unterschied zwischen dem nicht euklidischen wirklichen Weltall und einem euklidischen Kontinuum, wie zwischen unserem ebenen Blatt Papier und der Oberfläche unseres Eis, mit dem Unterschied allein, daß diese Flächen zwei Dimensionen haben, während das Weltall deren vier hat.

Der zweidimensionale Raum kann eben sein wie das Blatt Papier oder gekrümmt wie die Oberfläche des Eis. Man kann sogar, je nachdem man ein Blatt Papier eben läßt oder zusammenrollt, bewirken, daß die Geometrie, die man auf die darauf gezeichneten Figuren anzuwenden hat, euklidischen oder nichteuklidischen Charakter hat. Auf ganz entsprechende Weise kann der Raum mit mehr als zwei Dimensionen euklidisch sein oder nichteuklidisch.

In der Tat ist das Weltall, wie wir gesehen haben, ungefähr euklidisch nur in den Bereichen der Welt, die sehr weit von allen schweren Massen entfernt sind. Es ist nicht euklidisch, sondern gekrümmt in der Nachbarschaft der Gestirne, um so mehr, je näher man bei ihnen ist.

Die Geometrie des gekrümmten Raums, wie sie Riemann begründet hat, ist also diejenige, die besser für das wirkliche Weltall zu passen scheint. Sie hat Einstein bei seinen Berechnungen angewendet.

Bei unserem vorhin erbrachten Beweis dafür, daß die Lichtstrahlen wie Geschosse von gleicher Geschwindigkeit verlaufen, sind wir von folgender Erwägung ausgegangen: Da das »Intervall« zweier Ereignisse dasselbe ist für zwei Beobachter, deren Bewegung gleichförmig und verschieden ist, so ist es natürlich zu denken, daß es dasselbe auch für einen dritten Beobachter bleibt, dessen Geschwindigkeit von der des ersten zu der des zweiten allmählich übergeht, das heißt, dessen Geschwindigkeit gleichförmig beschleunigt ist.

Und wirklich gibt es keinen Grund dafür, daß zum Beispiel die Reisenden eines Zugs, der eine gleichbleibende Geschwindigkeit von 100 Kilometer in der Stunde hat, genau wie die eines anderen Zugs mit 50 Kilometer in der Stunde etwas Unveränderliches in den Erscheinungen beobachten, während dieses Unveränderliche nicht mehr so sein sollte für die Reisenden in einem dritten Zug, der stufenweise von der Geschwindigkeit des ersten zu der des zweiten übergeht. Das Gegenteil annehmen, hieße den beiden ersten oder ihresgleichen eine Vorrechtsstellung im Weltall einräumen. Wenn es nun aber einen Bereich gibt, der wirklich seine »Nacht des 4. August«* gehabt hat, einen Bereich, in dem die nicht gerechtfertigten Vorrechte von der neuen Physik unterdrückt wurden, so ist es doch wohl die Anschauung der Außenwelt.

* Brachte 1789 die Abschaffung der Adelsvorrechte in Frankreich.

Dieses Vorrecht der Beobachter in gleichförmiger Bewegung wäre um so weniger gerechtfertigt, als es sehr schwierig ist, wenn man den Dingen auf den Grund geht, eine gleichförmige Bewegung genau zu definieren.

Was besagt eigentlich die Behauptung, ein Zug habe eine gleichförmige Geschwindigkeit von 100 Kilometer in der Stunde? Das besagt, daß dieser Zug diese Geschwindigkeit besitzt mit Bezug auf das Geleise, mit Bezug auf den Boden. Aber mit Bezug auf einen in einem Ballon oder in einem anderen Zug fahrenden Beobachter hat diese Geschwindigkeit nicht mehr denselben Wert, sie kann aufhören eine gleichförmige Geschwindigkeit zu sein. Wir kennen nur relative Bewegungen, besser gesagt: Bewegungen relativ zu dem oder jenem materiellen Gegenstand. Je nach der Wahl dieses Gegenstands, dieses Vergleichspunkts kann dieselbe Geschwindigkeit gleichförmig oder beschleunigt sein. Man sieht, daß man schließlich zu der Newtonschen Hypothese des absoluten Raums zurückkommen müßte, um sagen zu können, ob eine gegebene Geschwindigkeit wirklich gleichförmig oder beschleunigt ist.

Darin liegt der tiefste Grund, warum das Einsteinsche Intervall der Dinge, die unveränderliche Größe, die »Invariante« dieselbe bleiben muß mit Bezug auf alle Beobachter ohne Rücksicht auf ihre Geschwindigkeiten und besonders für die Beobachter, die mit Geschwindigkeiten versehen sind, die an einem gegebenen Ort den Wirkungen der Gravitation gleichwertig sind.

Dann aber genügen unsere Schlußfolgerungen aus dem Michelsonschen Versuch (relativ zur Erscheinung der Ereignisse für Beobachter, die in gleichförmiger verschiedener Fortbewegung begriffen sind) nicht mehr, um uns die ganze Wirklichkeit zu erklären. Sie müssen ergänzt werden, und zwar so, daß die all-

gemeine Invariante, »das Intervall«, so bleibt für einen Beobachter, der in beliebiger Bewegung begriffen ist.

Wenn ich durch eine Straße gehe mit unerhörter Geschwindigkeit, aber in gleichförmiger Bewegung, so mag ihr Anblick im allgemeinen — infolge der mit meiner Geschwindigkeit zusammenhängenden Verkürzung — etwas verschieden von dem Anblick sein, der sich mir böte, wenn ich unbewegt wäre.* Die Häuser zum Beispiel werden mir schmäler erscheinen im Verhältnis zu ihrer Höhe. Indessen wird das allgemeine Bild und die allgemeinen Verhältnisse der Gegenstände in beiden Fällen ungefähr gleich sein und etwas gemein haben. So werden mir die Gasflammen dünner erscheinen, aber immer noch gerade sein.

Anders wird es sein, wenn der Beobachter mit verschiedenen Geschwindigkeiten beliebiger Art ausgestattet ist, wenn es zum Beispiel ein Betrunkener ist, und zwar ein Betrunkener nicht gewöhnlicher Art, der imstande ist, in erstaunlichen Geschwindigkeiten zu taumeln. Für diesen Betrunkenen wird die Straße, die er durchläuft, einen ganz neuartigen Anblick bieten. Die Gasflammen werden ihm nicht mehr gerade erscheinen, sondern verbogen in Zickzacklinien, welche im umgekehrten Sinn die Zickzacklinien wiedergeben, die er auf seinem schwankenden Gang beschreibt. Wie richtig das ist, zeigt auch der Brauch der Karikaturenzeichner, die von einem Betrunkenen gesehenen Bäume, Kandelaber und Häuser in toll gewundenen Linien darzustellen.

Unser Mann wird übrigens der Überzeugung sein, daß die Gegenstände in Wirklichkeit die Zickzackform haben, in der er sie sieht, und daß diese Form bei jedem Schritt anders wird. Ver-

* Selbstverständlich wird hier ein Beobachter mit einer Netzhaut vorausgesetzt, die auf Augenblickseindrücke reagiert.

sucht einmal, ihn zu überzeugen, daß e r tanzt und nicht die Straßenlaternen; versucht ihm zu zeigen, daß e r es ist, der nicht gerade geht, und nicht der Hund, den er oder vielmehr der ihn an der Leine führt. Kein Wort davon glaubt er, und wahrhaftig, vom Standpunkt der allgemeinen Relativität kann er recht haben, geradesogut wie ihr.

Und doch gibt es etwas, das im Bild der Welt das gleiche bleibt für den Betrunkenen und für den Wassertrinker.

Wenn das gesamte Weltall plötzlich in einer Gelatinemasse versänke, die zu Gallert erstarrte, und wenn man dann diese geleeartige Masse winden, zusammendrücken, verbiegen würde auf alle möglichen Arten, so bliebe doch immer noch etwas unverändert in diesem Gerinnsel. Was ist dieses Etwas, mit welcher Rechnungsart muß man ihm beikommen? Die Antwort auf diese Fragen bildete die letzte Wegstrecke, die Einstein zurückzulegen hatte, um die Gleichung der Gravitation und der allgemeinen Relativität aufzustellen.

Hier hat Henri Poincaré die Bahn abgesteckt. Um so mehr ist es nötig, das zu betonen, als dem französischen Gelehrten hierin sein Recht nicht ganz geworden ist.

Wenn alle Körper des Weltalls sich zufällig zu gleicher Zeit und in den gleichen Verhältnissen ausdehnten, so wären wir doch nicht in der Lage, das zu wissen. Da unsere Werkzeuge und wir selbst gleichermaßen ausgedehnt würden, würden wir nichts merken von diesem urgewaltigen geschichtlichen und kosmischen Ereignis, das uns keinen einzigen Augenblick über unser kleines lächerliches Alltagstreiben hinausheben würde.

Noch mehr: nicht nur sind die Welten ununterscheidbar, wenn sie sich so ändern, daß der Maßstab der Strecken und Zeiten

anders geworden ist; sie werden auch noch ununterscheidbar sein, wenn jedem Punkt der einen ein einziger Punkt der anderen entspricht und wenn jedem Gegenstand, jedem Ereignis der ersten Welt eines derselben Art genau an demselben Punkt der zweiten entspricht. Die aufeinanderfolgenden beliebigen Verbiegungen, der man die Gelatinemasse aussetzt, in die wir oben vergleichsweise das gesamte Weltall eingetaucht haben, liefern uns gerade jene ununterscheidbaren Welten. Poincaré gebührt der Ruhm, die Aufmerksamkeit darauf gelenkt und gezeigt zu haben, daß die Relativität der Dinge in diesem sehr weiten Sinn verstanden werden muß.

Das gestaltlose und verschiebbare Kontinuum, in das wir das Weltall verlegen, besitzt eine gewisse Zahl von Eigenschaften, die jeden Gedanken an Messung ausschließen. Die Untersuchung dieser Eigenschaften bildet den Gegenstand einer besonderen, einer qualitativen Geometrie. Die Lehrsätze dieser Geometrie haben die Eigentümlichkeit, daß sie wahr bleiben würden, auch wenn die Figuren von einem ungeschickten Zeichner nachgebildet würden, der alle Verhältnisse gröblich verletzen und die Geraden durch unregelmäßige, gewundene Linien ersetzen würde.

Das ist die Geometrie, die man anzuwenden hat auf das vierdimensionale, je nach seinen Punkten mehr oder weniger euklidische Kontinuum, das das Einsteinsche Weltall bildet. Diese Geometrie ist genau diejenige, die auseinandersetzt, was gemeinsam ist an den besonderen Formen der Gegenstände, wie sie unser Betrunkener und wie sie unser Wassertrinker sieht.

Auf dieser Bahn oder vielmehr auf einer ihr gleichlaufenden Bahn ist Einstein endlich zum Ziel gelangt. Da das Universum ein mehr oder weniger gekrümmtes Kontinuum ist, so kam er auf den Gedanken, die Geometrie auf sie anzuwenden, die Gauß

zur Untersuchung der Flächen mit variabler Krümmung geschaffen und die Riemann verallgemeinert hat. Mittels dieser besonderen Geometrie hat er die Tatsache ausgedrückt, daß »das Intervall« der Ereignisse eine Invariante ist.

Da haben wir nun ein Bild, das uns meines Erachtens ins Herz des Problems der Gravitation und zu seiner Lösung führen kann.

Betrachten wir nun eine Fläche mit variabler Krümmung, zum Beispiel die Oberfläche eines Stückes unserer Erde mit seinen Hügeln, seinen Bergen, seinen Wellenformen. Wenn wir dieses Gebiet nach allen Richtungen durchwandern, so können wir geradlinig gehen, solange wir in der Ebene sind. Die gerade Linie auf ebener Fläche hat die Eigentümlichkeit, daß sie der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten ist. Auch das ist ihr eigen, daß sie zwischen diesen zwei Punkten die einzige ihrer Art und ihrer Länge ist, während man eine sehr große Zahl nicht gerader Linien ziehen kann, die diese beiden Punkte ebenfalls verbinden, die länger sind als die Gerade, aber alle unter sich von derselben Länge.

Nun kommen wir aber in die hügelige Gegend. Jetzt ist es uns unmöglich, wenn wir von einem Punkt zu einem anderen gelangen wollen, der durch einen Hügel von ihm getrennt ist, an einer geraden Linie entlang zu gehen. Wie wir es auch angreifen, unser Weg ist gekrümmt. Aber unter den verschiedenen möglichen Wegen von dem einen Punkt zum anderen über den Hügel gibt es einen, und im allgemeinen nur einen, der kürzer ist als alle anderen, wie wir das feststellen können mit einer Meßschnur. Dieser kürzeste Weg, der in seiner Art der einzige ist, ist die sogenannte geodätische Linie der durchquerten Fläche.

Dementsprechend kann kein Schiff geradlinig fahren, um von Lissabon nach Neuyork zu gelangen. Alle müssen sie eine Kurvenfahrt machen wegen der runden Gestalt der Erde. Aber unter den möglichen Kurvenfahrten gibt es eine bevorrechtete, die kürzer ist als alle anderen, diejenige, die einem Großkreis der Erde folgt. Lissabon und New York liegen zwar ungefähr unter demselben Breitengrad. Trotzdem hüten sich die Schiffe, direkt West zu steuern in der Richtung der Breitengrade. Sie steuern etwas Nordwest, so daß sie in New York von Nordost her ankommen und ungefähr einem Erdgroßkreis folgen. Auf unserer Erdkugel ist wie auf allen Kugeln die geodätische Linie der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten, gleich dem durch diese beiden Punkte führenden Bogen des Großkreises.

So kann man auf allen krummen Flächen von einem Punkt zum anderen eine bevorrechtete Linie von einer Minimallänge ziehen, eine geodätische Linie, die auf diesen Flächen der Geraden in der Ebene entspricht.

Und so entspricht das Intervall zweier Punkte im vierdimensionalen Weltall bis auf das algebraische Zeichen genau der geodätischen Linie, der Linie des Minimalwegs im Weltall zwischen diesen beiden Punkten. Da, wo das Weltall gekrümmt ist, ist diese geodätische Linie eine Kurve; da, wo es ungefähr euklidisch ist, ist sie eine Gerade.

Man wird mir hier sagen, es sei sehr schwer, sich einen dreidimensionalen und nun gar einen vierdimensionalen Raum gekrümmt vorzustellen. Das gebe ich zu. Wir haben ja gesehen, daß es ziemlich schwierig ist, sich den vierdimensionalen Raum vorzustellen, selbst ohne Krümmung.

Was beweist das? Es gibt in der Natur noch andere Dinge, die wir uns nicht vorstellen, das heißt solche, von denen wir uns

kein Bild für den Gesichtssinn machen können. Die Hertzschen Wellen, die X-Strahlen, die ultravioletten Strahlen — sind sie darum weniger vorhanden, weil wir sie uns nicht vorstellen können, oder wenigstens, weil wir das nur können, indem wir ihnen eine sichtbare Form zuschreiben? Und die ist es gerade, die ihnen fehlt. Gewiß ist das eine der Schwächen der menschlichen Gebrechlichkeit, nichts zu fassen, was nicht Bildform hat. Daher jenes Bestreben, das uns treibt, alles zu »versichtbarlichen« (wenn ich dieses wenig schöne, aber ausdrucksvolle Wort wagen darf).

Kommen wir nun auf unsere geodätischen Linien zurück! Diese können wir uns sehr wohl vorstellen, denn sie sind im Weltall, trotz seinen vier Dimensionen, eindimensionale Linien, ähnlich allen Linien, die wir kennen.

Das Dasein der geodätischen Linien, der Linien der kürzesten Entfernung, wird uns den Zusammenhang zwischen Trägheit und Schwere, der in der euklidischen Welt der klassischen Wissenschaft nicht zutage getreten war, in allem Glanz enthüllen. Daher kam das Newtonsche „Distinguo" zwischen dem Trägheitsprinzip und der Schwerkraft.

Für uns Relativisten ist dieses „Distinguo" nicht mehr nötig. Die materiellen Massen, ebenso wie das Licht, verbreiten sich geradlinig fern von jedem Gravitationsfeld und in Kurvenlinien bei gravitierenden Massen. Aus Gründen der Symmetrie kann ein freier materieller Punkt im Weltall nur einer geodätischen Linie folgen.

Wenn man nun bedenkt, daß die von Newton zu Hilfe genommene Schwerkraft nicht existiert — und eine solche Wirkung in die Ferne ist ja sehr hypothetisch —, wenn man bedenkt, daß

es im leeren Raum nur frei sich selbst überlassene Gegenstände gibt, so wird man unwiderstehlich zu folgender These geführt, die unter einfacher Form die ehemals getrennten Schwestern, die Trägheit und die Schwere, vereinigt: Jeder bewegliche Körper, der frei sich selbst überlassen ist, beschreibt im Weltall eine geodätische Linie.

Fern von den massiven Gestirnen ist diese geodätische Linie eine Gerade, weil das Weltall ungefähr euklidisch ist. In der Nähe der Gestirne ist sie eine Kurve, weil das Weltall dort nicht euklidisch ist.

Welch wunderbare Auffassung, die in einer einzigen Regel das Trägheitsprinzip und das Gesetz der Schwere vereinigt! Großartige Synthese der Mechanik und der Gravitation, mit der die Scheidung verschwindet, die bis zur Stunde getrennte Wissenschaften ohne Zusammenhang aus ihnen machte.

In dieser kühnen und einfachen Theorie ist die Gravitation keine Kraft mehr. Wenn die Planeten Kurven beschreiben, so ist der Grund der, daß das Weltall in der Nähe der Sonne, wie in der Nähe jeder Zusammenballung der Materie, gekrümmt ist. Der kürzeste Weg von einem Punkt zum anderen ist eine Linie, die uns als Gerade erscheint, uns armen Zwergwesen, nur weil wir sie mit sehr kleinen Linealen und auf sehr geringfügigen Strecken messen. Wenn wir diese Linie auf Millionen von Kilometern verfolgen könnten und über eine ausreichende Zeitstrecke hin, so würden wir sie gebogen finden.

Kurz gesagt: wenn man mir ein Bild gestattet, das nur ein Gleichnis ist, so beschreiben die Planeten Kurven, weil sie sich in einem kurvenförmigen Weltall dem bequemsten Weg entlang bewegen, ebenso wie die Radfahrer auf der Radrennbahn, am

Wendepunkt angelangt, ihre Leitstange nicht zu drehen brauchen, sondern nur geradeaus radeln müssen, da die gekrümmte Neigung der Bahn sie ganz ohne weiteres zur Drehung bringt. Auf der Radrennbahn ist wie im Sonnensystem die Krümmung um so ausgeprägter, je näher man am inneren Rand der Rennbahn ist.

Nun bleibt nur das eine noch übrig, daß wir dem Weltall in der Raumzeit in seinen verschiedenen Punkten eine solche Krümmung zuweisen, daß die geodätischen Linien genau die Bahnen der Planeten und der fallenden Körper darstellen in der Voraussetzung, daß die Krümmung des Weltalls an jedem Punkt durch vorhandene oder in der Nähe befindliche materielle Massen verursacht ist.

Bei dieser Berechnung muß man auch den Umstand in Betracht ziehen, daß das »Intervall«, das heißt der zwischen zwei sehr nahen Punkten liegende Teil der geodätischen Linie eine Invariante sein muß für jeden beliebigen Beobachter. So kommt es, daß für den taumelnden Betrunkenen, den wir schon beigezogen haben, dieselbe geodätische Linie eine Kurve oder auch eine sinusförmige Linie ist, die für den unbewegten Beobachter eine Gerade ist. Die Länge dieser Linie, mag man sie gerade oder krumm sehen, bleibt sich gleich.

Zieht man alles das in Betracht, so gelingt es Einstein — dank den Feinheiten mathematischer Rechnungskunst, deren Sinn wir zur Genüge angedeutet haben —, in einer völlig unveränderlichen Formel das Gravitationsgesetz auszudrücken.

Wenn man nach dem Newtonschen Gesetz das Intervall zweier astronomischer Ereignisse berechnete, zum Beispiel zwei aufeinanderfolgende Stürze von Meteorsteinen auf die Sonne, so würde man finden, daß dieses »Intervall« nicht genau den-

selben Wert hat für Beobachter, die beliebige verschiedene Geschwindigkeiten besitzen.

Bei der neuen Einsteinschen Formel für das Gesetz besteht dieser Unterschied nicht mehr. Die beiden Gesetze unterscheiden sich übrigens nicht sehr, was man auch wohl erwarten durfte angesichts der Genauigkeit, mit der das Newtonsche Gesetz seit zwei Jahrhunderten von den Astronomen bestätigt wurde. Die Verbesserung, die Einstein am Newtonschen Gesetz anbrachte, kommt im Grunde (wenn wir die alte Sprache des euklidischen Weltalls anwenden wollen) darauf hinaus, das Gesetz als richtig anzuerkennen, vorausgesetzt, daß die Abstände der Planeten von der Sonne mit einem Metermaß gemessen werden, dessen Länge mit der Annäherung an die Sonne um ein geringes abnimmt.

Es ist erstaunlich, daß Newton und Einstein dazu kommen, unter einer beinahe völlig gleichen Formel die Bewegungen der gravitierenden Sterne zu begreifen; denn ihre Ausgangspunkte sind außerordentlich verschieden.

Newton geht aus von der Hypothese des absoluten Raums, von den Erfahrungsgesetzen über die Bewegung der Planeten, wie sie in den Keplerschen Gesetzen ausgedrückt sind, und von der Angleichung der Schwerkraftanziehung an eine Kraft, die der Masse proportional ist. Einstein dagegen stellt seine Berechnungen an, indem er von den oben angedeuteten Bedingungen der Unveränderlichkeit ausgeht. Er geht in gewissem Sinn vom philosophischen Postulat aus, von dem Prinzip, von dem Bedürfnis, zu behaupten, daß die Naturgesetze unveränderlich sind, unabhängig vom Gesichtspunkt, unrelativ, wenn der Ausdruck erlaubt ist. Einstein gibt sogar die Hypothese auf, welche die

Krümmung der Gravitationsbahnen einer besonderen Anziehungskraft zuschrieb.

Und doch — trotz dieses Ausgangs von einem Standpunkt, der völlig verschieden ist von dem Newtonschen und der von Haus aus weniger mit Hypothesen überladen ist — kommt Einstein auf ein Gravitationsgesetz, das beinahe identisch ist mit dem Newtonschen Gesetz.

Dieses »beinahe« ist aber hochinteressant, denn es setzt uns in den Stand, zu ermitteln, welches Gesetz genau ist, das Newtonsche oder das Einsteinsche. Wenn sie zu demselben Ergebnis führen, solange es sich um Geschwindigkeiten handelt, die schwach sind relativ zum Licht, so geben die beiden Gesetze etwas abweichende Ergebnisse, wenn es sich um sehr große Geschwindigkeiten handelt. Wir haben gesehen, daß das Licht selbst in der Nähe der Sonne eine Ablenkung erleidet, die dem Einsteinschen Gesetz genau entspricht, die aber das Newtonsche Gesetz nicht in dieser Weise in Aussicht nahm.

Aber es gibt noch eine andere Abweichung zwischen den beiden Gesetzen. Nach dem Newtonschen beschreiben die Planeten um die Sonne Ellipsen, die — unter Vernachlässigung der von den anderen Planeten herrührenden Störungen — eine streng fixierte Lage haben.

Legen wir eine der Länge der Frucht nach ausgeschnittene Zitronenscheibe auf einen Tisch, und denken wir uns an der Wölbung des großen halbkugelförmigen Saals, in dessen Mitte der Tisch stehen möge, die Hauptsterne, die Sternbilder des Nordhimmels gemalt. Unsere Zitronenscheibe hat ungefähr Ellipsenform, und wenn wir nun die Sonne mit einem der Kerne gleichsetzen, so mag sie die Bahn eines Planeten im Sternenweltall darstellen. Das Newtonsche Gesetz besagt, daß — unter den nö-

tigen Vorbehalten — die Planetenbahn eine feste Orientierung unter den Sternen beibehält, während der Planet unendliche Male seine Bahn durchläuft. Das besagt, daß unsere Zitronenscheibe unbewegt bleibt.

Das Einsteinsche Gesetz dagegen sagt im Gegenteil, daß die Ellipsenbahn sich — außerordentlich langsam — dreht unter den Sternen, während der Planet die Bahn durchläuft. Das bedeutet, daß unsere Zitronenscheibe auf ihrem Tisch sich leicht drehen muß, und zwar so, daß die zwei spitzigen Enden der Zitrone nicht mehr denselben auf die Deckenwölbung gemalten Sternen gegenüberstehen.

Wenn man nach dem Einsteinschen Gesetz den Betrag errechnet, um den die Ellipsenbahnen der Planeten sich drehen müssen, so findet man, daß dieser Betrag wegen seiner Geringfügigkeit nicht zu beobachten ist, wenn man von einem Planeten, dem schnellsten von allen, dem Merkur, absieht.

Merkur vollendet seinen ganzen Umlauf um die Sonne in ungefähr 88 Tagen, und das Einsteinsche Gesetz zeigt, daß seine Bahn zu gleicher Zeit sich um einen kleinen Winkel drehen muß, der sich im Verlauf eines Jahrhunderts auf 43 Bogensekunden (43″) beläuft. So klein sie ist, diese Größe gehört zu denen, welche die Astronomen mit ihren verfeinerten Methoden leicht messen können.

Nun hatte man schon im letzten Jahrhundert bemerkt, daß Merkur allein unter allen Planeten eine kleine Regelwidrigkeit in seiner Bewegung aufwies, die mit dem Newtonschen Gesetz unerklärlich war. Le Verrier stellte aus diesem Anlaß erstaunliche Berechnungen an in dem Gedanken, daß diese Regelwidrigkeit von der Anziehung eines unbekannten Sterns herrühre, der sich zwischen Merkur und der Sonne befinde. Er hoffte so durch

Rechnung einen intramerkuriellen Planeten zu entdecken, so wie er den transuranischen Planeten Neptun entdeckt hatte.

Aber niemals enthüllte die Beobachtung den angekündigten Planeten, und die Regelwidrigkeit der Bewegung des Merkurs bildete immer noch die Verzweiflung der Astronomen. Worin bestand nun aber diese Regelwidrigkeit? Gerade in einer normwidrigen Rotation der Planetenbahn, die nach den Berechnungen Le Verriers 43 Bogensekunden im Jahrhundert beträgt. Genau die Ziffer, die man ohne jede Hypothese aus dem Gravitationsgesetz Einsteins ableitet.

Nun ergibt sich allerdings nach den neuen Berechnungen Großmanns, aus den von Newcomb zusammengefaßten astronomischen Beobachtungen, daß der tatsächlich festgestellte Wert der ein Jahrhundert umfassenden Verschiebung der Sonnennähe Merkurs nicht 43″ beträgt, wie Le Verrier meinte, sondern höchstens 38″. Die Übereinstimmung mit der theoretisch berechneten Zahl Einsteins ist, wenn sie nicht vollkommen ist (was ja ganz außerordentlich war), darum nicht weniger schlagend innerhalb der Unsicherheit der Beobachtungen.

Das Einsteinsche Gesetz hat dieselbe Genauigkeit wie das Newtonsche, solange es sich um langsame Planeten handelt. Aber bei den rascheren Gestirnen, deren Bewegung die Beobachtung mit höherer Genauigkeit zu erkennen gestattet, versagt das Newtonsche Gesetz, während das Einsteinsche sich siegreich bewährt.

Diese Vervollkommnung von etwas, was man für vollkommen hielt, nämlich des Newtonschen Werks, ist ein schöner Triumph des menschlichen Geistes.

Die Astronomie, die Himmelsmechanik gewinnen dabei eine vermehrte Genauigkeit und prophetische Kraft. Getragen von

den siegreichen Flügeln der Berechnung verstehen wir es jetzt besser als noch vor kurzem, dem Sphärenlauf der Gestirne zu folgen und ihm vorauszueilen über die Jahrhunderte hinüber und im grenzenlosen Raum.

Es gibt noch ein anderes Kriterium für das Einsteinsche Gravitationsgesetz. Wenn dieses exakt ist, so wächst die Dauer eines Ereignisses nach Einstein, wenn das Gravitationsfeld intensiver wird. Folglich muß die Dauer der Schwingung eines gegebenen Atoms auf der Sonne größer sein als auf der Erde. Die Wellenlängen der Spektralstreifen eines und desselben chemischen Elements müssen im Sonnenlicht etwas größer sein als in einem Licht irdischen Ursprungs. In diese Richtung weisen neueste Experimente. Doch ist die Bestätigung hier weniger exakt als im Fall Merkurs, denn andere Ursachen können hier einwirken, um die Wellenlänge des Lichts zu verändern.

Alles in allem ist die gewaltige Synthese, welche Einstein die Theorie der allgemeinen Relativität genannt hat und deren große Linien wir eben sehr rasch umrissen haben, in der Tat ein hochragendes schönes Geistesgebäude und zugleich ein glänzendes Werkzeug, um in das Geheimnis der Dinge einzudringen.

Wissen heißt voraussehen. Nun, diese Theorie sieht voraus und besser als ihre älteren Geschwister. Sie vereinigt zum erstenmal in ein einziges Bündel die Gravitation und die Mechanik. Sie zeigt, wie die Materie der Außenwelt eine Krümmung auferlegt, von der die Gravitation nur das mathematische Zeichen ist, wie die Algen, die man auf dem Meer schwimmen sieht, nur die Zeichen der Strömung sind, die sie mitführt.

Welche Abänderungen ihr auch in der Zukunft noch bevorstehen — denn jede Wissenschaft bleibt immer der Vervollkomm-

nung fähig —, sie hat unter den Naturgesetzen mehr von jener Harmonie kundgetan, die aus der Einheit entspringt.

Aber ich habe genug darüber gesagt, wenn ich ein Verständnis davon oder vielmehr ein Gefühl dafür geweckt habe, ohne mich jenes reinen Lichts zu bedienen, das die Geometrie auf das Unsichtbare hinauswirft.

7

Ist das Weltall unendlich?

Kant und die Zahl der Sterne • Erloschene Sterne und dunkle Nebelflecke • Ausdehnung und Aussehen des astronomischen Weltalls • Verschiedene Arten von Welten • Poincarés Berechnung • Die physische Begriffsbestimmung des Unendlichen • Das Unendliche und das Schrankenlose • Stabilität und Krümmung der kosmischen Raumzeit • Wirkliche und mögliche Sterne • Durchmesser des Einsteinschen Weltalls • Die Hypothese der Ätherblasen

Ist das Weltall unendlich? Diese Frage haben sich die Menschen von jeher gestellt — vielleicht ohne ihren Sinn genau zu fassen. Die allgemeine Relativitätstheorie macht es uns möglich, sie unter einem neuen, sehr fein gewählten Gesichtspunkt in Angriff zu nehmen.

Kant — dieser geniale Brummbär, der es furchtbar eintönig fand, daß alljährlich dieselbe Sonne glänzte und derselbe Frühling blühte — gründete die Behauptung, daß der Raum unendlich und überall mit ähnlichen Sternen besät sei, auf metaphysische Erwägungen.

Es ist vielleicht klüger, dieses Problem nur mit Hilfe neuer Beobachtungsdaten zu untersuchen, wobei wir die Tür der Diskussion sorgfältig verschließen vor der Metaphysik, dieser Kartenmischerin. Ohnehin würde uns diese nötigen, den reinen Raum

zu definieren, zuzugeben, daß wir nichts über ihn wissen, und sogar zu bezweifeln, ob er existiert.

Der Beweis dafür, daß wir nicht viel von ihm wissen, ist der Umstand, daß die Newtonianer an ihn glauben, während die Einsteinianer ihn nur als eine Eigenschaft der Gegenstände, die von ihnen untrennbar ist, auffassen. Sie definieren den Raum durch die Materie; so müssen sie nun diese definieren. Descartes dagegen definierte die Materie durch die Ausdehnung, das heißt durch den Raum. Zirkelerklärung! Das beste ist also, die metaphysischen Gedankengänge Kants entschieden aus unserer Darlegung zu entfernen und uns mit aller Leidenschaft der Erfahrung, dem Meßbaren, zu ergeben.

Der Einfachheit halber wollen wir die Wirklichkeit jenes Kontinuums annehmen, in dem die Gestirne schwimmen, das die Strahlungen durcheilen und das der gesunde Menschenverstand den Raum heißt. Wenn es überall und ins Grenzenlose hinaus Sterne gäbe und wenn deren Zahl unendlich wäre, so gäbe es zugleich überall Raum und überall Materie. Die Newtonianer könnten triumphieren wie die Einsteinianer, diese, welche an den absoluten Raum glauben, wie jene, welche ihn leugnen, die Absolutisten wie die Relativisten.

Wie schön, wenn die astronomischen Beobachtungen zeigen würden, daß die Zahl der Sterne in der Tat unendlich ist und daß folglich die Verfechter der beiden entgegengesetzten Anschauungen gleicherweise Siegesberichte herausgeben könnten. Aber was zeigen die astronomischen Beobachtungen?

Es gibt Leute, die a priori bestritten, daß die Zahl der Sterne unendlich sei. Die Zahl der Sterne, sagten sie, könnte vermehrt werden; sie ist also nicht unendlich, da man zum Unendlichen nichts hinzufügen kann. Diese Schlußfolgerung ist bestechend,

aber falsch, obwohl Voltaire sich von ihr hat imponieren lassen. Man braucht kein großer Gelehrter in mathematicis zu sein, um zu wissen, daß man einer unendlichen Zahl immer noch etwas hinzufügen kann und daß es unendliche Größen gibt, die selbst wieder unendlich klein sind in bezug auf andere.

Kommen wir also zu den Tatsachen!

Wenn das Sternenweltall kein Ende hat, so gibt es keine einzige Visierlinie von der Erde zum Himmel, die nicht auf eines dieser Gestirne stoßen müßte. Der deutsche Astronom Olbers hat bemerkt, daß der gesamte Nachthimmel dann einen Glanz haben müßte, der dem der Sonne vergleichbar wäre. Nun ist aber der gesamte Lichtglanz aller Sterne zusammen kaum dreitausendmal so stark wie der eines Sterns erster Größe, das heißt dreißig millionenmal geringer als der der Sonne.

Aber das beweist nichts, denn die Schlußfolgerung von Olbers ist falsch aus zwei Gründen. Einmal gibt es notwendigerweise am Himmel viele erloschene oder dunkle Sterne. Wir kennen solche, die sehr wohl untersucht, ja sogar gewogen worden sind, und die ihr Dasein kundtun, indem sie in regelmäßigen Zwischenräumen Nachbarsterne verfinstern, um die sie sich drehen. Anderseits hat man seit einiger Zeit entdeckt, daß der Himmelsraum auf weite Strecken hin von dunklen gasförmigen Massen und von Wolken kosmischen Staubs besetzt ist, welche das Licht der dahinterliegenden Sterne aufsaugen. So sieht man wohl, daß das Dasein einer unendlichen Zahl von Sternen durchaus vereinbar ist mit der schwachen Helligkeit des Nachthimmels.

Und wenn wir nun unsere Brillen aufsetzen, ich meine unsere Fernrohre, und wenn wir vom Reich des Möglichen ins Reich des Wirklichen übergehen, so liefern uns die neuesten astrono-

nomischen Beobachtungen eine gewisse Zahl sehr bemerkenswerter Tatsachen, die unausweichlich zu folgenden Schlüssen führen.

Die Zahl der Sterne ist nicht, wie man lange meinte, bloß wegen der Kraft unserer Fernrohre begrenzt. Wenn man sich von der Sonne entfernt, bleibt die in einer Raumeinheit enthaltene Zahl der Sterne, ihre Häufigkeit, die Sternbevölkerungsdichte sozusagen nicht gleichförmig, sie wird geringer, je näher man den Grenzbezirken der Milchstraße kommt.

Diese ist ein riesiges Inselmeer von Sternen, und unsere Sonne scheint in ihrer Zentralgegend zu liegen. Diese Ansammlung, dieser Ameisenhaufen von Sternen, zu dem wir gehören, hat im großen und ganzen die Form eines Uhrgehäuses, dessen Dicke ungefähr die Hälfte ihrer Größe wäre. Das Licht, das in einer Sekunde von der Erde zum Mond geht, in 8 Minuten von der Erde zur Sonne, in 3 Jahren von der Erde zum nächsten Stern, — das Licht braucht mindestens 30 000 Jahre oder 300 Jahrhunderte, um die Milchstraße zu durchlaufen.

Die Milchstraße enthält eine Zahl von Sternen, die zwischen 500 und 1500 Millionen liegt. Das ist eine sehr kleine Zahl, höchstens gleich derjenigen der menschlichen Wesen auf der Erde und viel kleiner als die Zahl der in einem Stecknadelkopf enthaltenen Eisenmoleküle.

Außerdem hat man sehr dichtgedrängte Anhäufungen von Sternen entdeckt, wie die Magalhaeswolke, den Herkuleshaufen und verschiedene andere, die kaum über die Grenzbezirke unserer Milchstraße hinauszureichen scheinen und ihre Vorstädte sind. Diese Vorstädte scheinen sich übrigens sehr weit zu erstrecken, besonders nach einer Seite der Milchstraße hin; und der fernste ist vielleicht nicht weniger als 200 000 Lichtjahre von uns entfernt.

Darüber hinaus scheint der Raum öde und sternenleer auf ungeheure Strecken hin relativ zu den Ausmessungen unseres Milchstraßenweltalls, wie wir es eben bestimmt haben. Aber noch weiter hinaus?

Noch weiter hinaus findet man jene sonderbaren Gestirne, die man Spiralnebel heißt und die wie Silberschnecken im Sternengarten liegen und von denen man mehrere Hunderttausende festgelegt hat. Gewisse Astronomen glauben, daß diese spiralförmigen Gestirnhaufen vielleicht Anhängsel der Milchstraße sind und verkleinerte Nachbilder von dieser. Die meisten neigen dem Gedanken zu, und zwar mit sehr starken Gründen, daß die Spiralnebel Systeme sind, die ganz und gar der Milchstraße entsprechen und Größenverhältnisse haben, die denen der Milchstraße vergleichbar sind.

Im ersten Fall hat die Gesamtheit der unseren Fernrohren zugänglichen Gestirne Maße, die für das Licht in einigen Hunderttausenden von Jahren durchmeßbar sind. Bei der zweiten Hypothese sind die Größenverhältnisse des Sternenweltalls, dem wir angehören, zehnmal so groß; das Licht würde mindestens Millionen von Jahren brauchen, um sie zu durcheilen.

Im ersten Fall wird das Sternenweltall, so wie es uns zugänglich ist, durch die Milchstraße und ihre Anhängsel gebildet, das heißt durch eine örtliche Ansammlung von Sternen, über die hinaus man nichts beobachtet. Das Sternenweltall ist also praktisch beschränkt oder wenigstens endlich.

Im entgegengesetzten Fall ist die Milchstraße nur noch einer der Myriaden von Spiralnebeln, die man beobachten kann. Der Spiralnebel (mit seinen Hunderten von Millionen Sternen) spielt in diesem Weltall von größeren Maßen dieselbe Rolle wie der Stern in der Milchstraße. Das Problem erhebt sich aber ge-

radeso wie vorhin, nur in größerem Maßstab, so wie die Milchstraße aus einer Anhäufung, aus einer Zusammenballung von Sternen in begrenzter Zahl gebildet ist — das beweist die Beobachtung —, ist so das uns zugängliche Weltall aus einem Haufen von Spiralnebeln von endlicher Zahl gebildet?

Über diesen letzteren Punkt hat die Erfahrung sich noch nicht ausgesprochen. Aber es ist nach meinem Gefühl wahrscheinlich, wenn unsere Instrumente einmal eine Kraft haben werden, die dem gewaltigen Problem gewachsen ist, das heißt bald — in einigen Jahrhunderten, daß sie dann antworten werden: Ja.

Wenn es anders wäre, wenn die Verteilung der Spiralnebel immer ungefähr die gleiche bliebe, je weiter man schreitet, so würde die Gravitation in diesem Weltall, zum Beispiel in der Gegend, in der wir leben, über alle Maße hinauswachsen. Denn die Anziehung wirkt im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernungen. Nun ist das aber nicht der Fall.

Das beweist: entweder daß auf sehr große Entfernungen hin die Anziehung zweier Massen etwas rascher abnimmt als nach dem umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernungen (was nicht ganz unmöglich ist) oder daß die Zahl der Sternensysteme und der Sterne endlich ist. Persönlich neige ich der zweiten Hypothese zu; aber sie ist unbeweisbar. In diesen Dingen gibt es immer ein »So oder so«, immer ein Mittel zum Ausweichen nach der Richtung der persönlichen Neigungen, und nichts gibt uns schließlich das Recht, positiv zu behaupten, daß die Zahl der Sterne endlich ist.

Ausgehend von dem beobachteten Mittelwert der Eigenbewegungen der uns benachbarten Sterne hat Henri Poincaré berechnet, daß die Gesamtzahl der Sterne der Milchstraße unge-

fähr eine Milliarde sein muß. Diese Zahl stimmt recht wohl mit derjenigen überein, die experimentell aus den Schätzungen der Sternphotographie hervorgeht.

Er hat auch gezeigt, daß die Eigenbewegungen der Sterne viel stärker sein müßten, wenn es viel mehr Sterne geben würde, als wir sehen. So laufen die Berechnungen Poincarés der Hypothese einer unbegrenzten Ausdehnung des Sternenweltalls zuwider, da die Zahl der gezählten Sterne ungefähr mit der Zahl der »errechneten« übereinstimmt. Aber, um es noch einmal zu sagen: diese Berechnungen beweisen nichts, wenn das Gesetz der Anziehung nicht ganz dem umgekehrten Quadrat der Entfernungen folgt bei den übergroßen Distanzen.

Wenn jedoch das Weltall endlich ist in dem Raum, wie ihn die klassische Wissenschaft auffaßt, würden das Licht der Sterne und die Sterne selbst in ihrer Vereinzelung sich allmählich unwiederbringlich im Unendlichen verlieren, und der Kosmos würde vergehen. Unserem Geist widerstrebt diese Folgerung, und die astronomischen Beobachtungen ergeben keinen Hinweis auf ein solches Aus-den-Fugen-Gehen.

Mit einem Wort: im Raum der Absolutisten kann das Sternenweltall unendlich nur dann sein, wenn das Gesetz vom Quadrat der Entfernungen für sehr entfernte Massen nicht ganz genau ist, und es kann nur endlich sein, wenn es in der Zeit vergänglich ist.

Im übrigen konnte für Newton das Sternenweltall endlich sein in einem unendlichen Weltall, da der Raum für ihn die Materie nicht als Voraussetzung fordert. Für Einstein dagegen sind das Weltall kurzweg und das materielle oder Sternenweltall ein und dasselbe, da es keinen Raum gibt ohne Materie oder Energie.

Die besprochenen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verschwinden großenteils, wenn man den Raum oder vielmehr die Raumzeit vom Einsteinschen Gesichtspunkt der allgemeinen Relativität betrachtet.

Was bedeuten die Worte: Ist das Weltall unendlich? Vom Einsteinschen wie vom Newtonschen wie vom pragmatistischen Gesichtspunkt bedeutet das: Wenn ich geradeaus gehe, immer und bis ans Ende in Ewigkeit, so werde ich nie zu meinem Ausgangspunkt zurückkommen.

Ist das möglich? Newton sagt notgedrungen: Ja, da der Raum sich für ihn grenzenlos ausdehnt, unabhängig von den Körpern, die in ihm versunken sind, mag die Zahl der Sterne begrenzt sein oder nicht.

Aber Einstein sagt: Nein. Für den Relativisten kann das Weltall nicht unendlich sein. Ist es also beschränkt, begrenzt durch irgendein Geländer? Nein. Es ist nicht beschränkt.

Es kann etwas unbeschränkt sein, ohne unendlich zu sein. Zum Beispiel kann ein Mensch, der auf der Oberfläche der Erde von Ort zu Ort geht, unendlich oft auf ihr in allen Richtungen hin und her gehen, ohne auf eine Schranke zu stoßen. Die so betrachtete Oberfläche der Erde ist also wie die Oberfläche jeder beliebigen Kugel zugleich endlich und schrankenlos. Es genügt nun aber, auf den dreidimensionalen Raum zu übertragen, was im zweidimensionalen vorgeht — und das ist ja die Kugeloberfläche —, um zu verstehen, daß das Weltall zugleich endlich und schrankenlos sein kann.

Wir haben gesehen, daß der Gravitation wegen das Einsteinsche Weltall nicht euklidisch ist, sondern gekrümmt. Es ist schwierig, wenn nicht unmöglich, wie wir schon sagten, sich eine Krümmung des Raums vorzustellen, anschaulich zu machen.

Aber diese Schwierigkeit braucht nur für unsere Phantasie zu bestehen, die durch unsere Sinnengewohnheiten begrenzt ist. Nicht für unsere Vernunft, die weiter und höher greift. Denn auch das ist noch einer der häufigsten Irrtümer der Menschen, zu meinen, die Phantasie habe gewaltigere Flügel als die Vernunft. Um sich vom Gegenteil zu überzeugen, braucht man nur zu vergleichen, was die phantasievollsten Alten zu träumen vermochten vom Sternengewölbe und was die heutige Wissenschaft uns von ihm zeigt.

Unser Problem ist nun folgendermaßen zu fassen.

Lassen wir vorerst die etwas unregelmäßige Verteilung der Sterne in unserem Sternensystem beiseite, und denken wir es uns ungefähr gleichartig! Was ist die Bedingung dafür, daß die Verteilung der Sterne unter dem Einfluß der Gravitation beständig bleibt? Die von der Berechnung gelieferte Antwort lautet: Dazu muß die Krümmung des Raums konstant sein und so, daß der Raum sich in sich zusammenschließt nach Art einer Kugeloberfläche.

Die Lichtstrahlen der Sterne können ewig, unendlich oft dieses schrankenlose und doch endliche Weltall umwandern. Wenn der Kosmos in dieser Weise kugelförmig ist, so kann man sich sogar vorstellen, daß die von einem Stern, zum Beispiel von der Sonne ausgehenden Strahlen auf dem gerade entgegengesetzten Punkt des Weltalls zusammenlaufen, nachdem sie die Runde herum gemacht haben.

So könnte man sich darauf gefaßt machen, an entgegengesetzten Punkten des Himmels Sterne zu sehen, von denen der eine nur das Abbild, nur das Phantom des anderen wäre oder sein Doppelgänger in dem Sinn, wie die alten Ägypter das Wort auffaßten. Und wirklich würde dieser Doppelgänger, dieses

Abbild eines Sterns uns nicht das zeigen, was der Erzeugungsstern, der objektive Stern ist, sondern was er war zu der Zeit, da er die Strahlen entsandte, die dieses Bild formen, das heißt Millionen Jahre vorher.

Wenn wir von einem gegebenen Punkt unseres Sternensystems, zum Beispiel von unserem Planeten aus zu gleicher Zeit den objektiven Stern und den Abbildstern beobachten, die Wirklichkeit und die Spiegelung, so sehen wir sie in sehr verschiedenem Zustand, da das Abbild uns das Urbild so zeigt, wie es Tausende von Jahrhunderten früher war. Es kann sogar vorkommen, daß der Abbildstern glänzender ist als der objektive Stern, weil dieser in der Zwischenzeit erloschen, durch den Einfluß der Jahrhunderte allmählich erkaltet ist.

Tatsächlich allerdings ist es unwahrscheinlich, daß wir oft auf solche Sternphantome, solche scheinbare Sterne stoßen. Denn die Strahlen werden bei ihrer Wanderung durch das Weltall im allgemeinen von den Sternen, in deren Nähe sie vorbeikommen, abgelenkt. Ihre Zusammenfassung, ihr Zusammenlaufen wird also selten vollkommen sein an der Gegenfüßlerstelle des wirklichen Sterns. Und dann werden diese Strahlen mehr oder von den kosmischen Materien weniger aufgesaugt worden sein, auf die sie unterwegs gestoßen sind. Und doch ist es nicht unmöglich, daß die Astronomen manchmal in Zukunft diese Erscheinung beobachten. Es ist nicht unmöglich, daß sie sie schon in der Vergangenheit beobachtet haben, ohne es zu wissen!

Aber was den Beobachtern gestern nicht gelungen ist, das werden sie morgen können dank den Anregungen der neuen Wissenschaft, und so wird sie vielleicht eine Umwälzung in der

Beobachtungsastronomie hervorrufen und eines Tages die strahlende Glorie neuer Bestätigungen darin finden.

Welch merkwürdige, verblüffend unerwartete Folgerungen aus den neuen Auffassungen, die in ihrer phantastischen Poesie alle noch so romantischen Gedankengebäude übertreffen! Das Wirkliche oder wenigstens das Mögliche erhebt sich in schwindelnde Höhen, welche die goldenen Flügel der Phantasie nie erreicht haben.

Ich sprach eben von den Millionen Jahren, welche das Licht braucht für seine Wanderung um unser gekrümmtes Weltall herum. Man kann eben, ausgehend von dem ungefähr bekannten Wert der in der Milchstraße enthaltenen Menge der Materie, leicht die Krümmung der Welt und ihren Radius berechnen. Man findet, daß dieser Radius einen Wert hat, der mindestens 150 Millionen Lichtjahren gleichkommt.

Das Licht braucht also mindestens 900 Millionen Jahre, um das Weltall zu umwandern, wenn dieses auf die Milchstraße und ihre Anhängsel beschränkt ist. Diese Ziffer ist vollkommen vereinbar mit denjenigen, welche uns eben die astronomischen Beobachtungen über die Ausdehnung des Milchstraßensystems ergeben haben, und auch mit den bei weitem größeren, die wir erzielt haben, wenn wir die Spiralnebel mit Milchstraßen gleichsetzen.

So kann für den Relativisten das Weltall schrankenlos sein, ohne unendlich zu sein.

Was den Pragmatisten betrifft, der gerade vor sich hingeht — das heißt, der einer sogenannten geraden Linie, dem Weg des Lichts folgt —, nun, er wird schließlich notgedrungen das Gestirn wieder finden müssen, von dem er ausgegangen ist, vorausgesetzt, daß er über genügend Zeit verfügt. Er wird also sagen, wenn die Natur der Dinge so ist: Das Weltall ist nicht unendlich.

Die Unendlichkeit oder Endlichkeit des Weltalls kann also im Prinzip durch die Erfahrung nachgeprüft werden, und man wird eines Tags feststellen können, ob der Kosmos in seiner Gesamtheit und ob der Raum newtonisch oder einsteinisch sind. Leider ist das eine sehr langwierige Erfahrung, der sich noch einige kleine praktische Schwierigkeiten entgegenstellen werden.

Man braucht also, ohne sich zuviel zu vergeben, bis auf weiteres sich nicht für verpflichtet anzusehen, zwischen den zwei Auffassungen zu wählen.

Es gibt vielleicht noch einen dritten Ausweg, wenn nicht für den Pragmatisten, so doch für den Philosophen, worunter ich den Physiker verstehe in der Erinnerung daran, daß die Engländer die Physik natural philosophy heißen.

Nämlich: wenn alles, was wir von Gestirnen kennen, mit unserer Milchstraße zusammenhängt, so können andere sehr entfernte Welten uns unzugänglich sein, weil sie optisch von der unseren abgeschlossen sind, vielleicht infolge von Erscheinungen kosmischer Aufsaugung des Lichts, von der wir schon gesprochen haben.

Aber das kann auch durch etwas anderes veranlaßt sein, das vielleicht bei einigen Relativisten Anstoß erregen, den Newtonianern aber möglich erscheinen wird. Der Äther, dieses Medium, das die Lichtschwingungen übermittelt und dessen Dasein Einstein schließlich selbst wieder als möglich angenommen hat, obwohl er ihm seine hergebrachten Bewegungseigenschaften bestreitet, der Äther, sage ich, und die Materie scheinen mehr und mehr nur Modalitäten voneinander zu sein. Wir haben das in einem früheren Kapitel nach den neuesten physikalischen Entdeckungen auseinandergesetzt. Nichts hindert also,

daß diese beiden Formen der Substanz immer miteinander verbunden sind.

Habe ich also nicht das Recht zu denken, daß vielleicht unser gesamtes sichtbares Weltall, eine örtliche Zusammenballung von Materie, nur eine vereinzelte Ätherblase ist? Wenn der absolute Raum existiert (was nicht heißt, daß er für uns sinnenfällig zugänglich ist), so ist er unabhängig nicht nur von der Materie, sondern auch vom Äther. Und dann dehnen sich um unser Weltall her ätherlose Räume aus. Andere Welten zucken vielleicht auf weit draußen, und diese Welten sind für uns auf ewig, wie wenn sie nicht wären.

Nichts Sinnenfälliges, nichts Erkennbares kann uns von ihnen zukommen. Nichts kann die schwarzen, stummen Schlünde überschreiten, die unsere Sterneninsel umgeben.

Unsere Blicke sind auf ewig gefangen in dieser Monade, die riesenhaft und doch noch klein genug ist.

Es gibt also Dinge, die man niemals kennen wird und die vielleicht doch existieren, werden die Harmlosen erstaunt ausrufen. Welch komischer Anspruch, alles fassen zu wollen in einigen Kubikzentimetern grauer Substanz!

8

Wissenschaft und Wirklichkeit

*Das Einsteinsche Absolute * Die Offenbarung durch die Wissenschaft * Erörterung der Erfahrungsgrundlagen der Relativität * Andere mögliche Erklärungen * Beweise zugunsten der wirklichen Verkürzung von Lorentz * Der Newtonsche Raum kann vom absoluten Raum verschieden sein * Das Wirkliche ist eine bevorrechtete Form des Möglichen * Zwei Einstellungen gegenüber dem Unbekannten*

Und nun gilt es zum Abschluß zu kommen.

Hat die Wirklichkeit, wenn man sie durch das scharfe Prisma der Wissenschaft ansieht, mit den neuen Theorien ihr Gesicht gewandelt? Ja, sicherlich. Die relativistische Lehre behauptet, sie habe die Farbenzersetzungskraft dieses Prismas vollkommener gemacht und eben damit das Weltbild, das es uns liefert, richtiger gestaltet.

Raum und Zeit, diese beiden Pole, um die sich die Sphäre der sinnenfälligen Daten drehte und die man für unerschütterlich hielt, haben ihre gewaltige Starrheit aufgeben müssen. An ihrer Stelle läßt Einstein jenes Kontinuum erstehen, in dem die Wesen und die Erscheinungen schwimmen: die vierdimensionale Raumzeit, in der Zeit und Raum an ein gemeinsames Joch gebunden sind.

Aber dieses Kontinuum selbst ist vielleicht nur eine schlaffe Form ohne Starrheit, die sich gefügig allem anpaßt. Nichts

Festes mehr, da kein bestimmter Ruhepunkt da ist, an dem wir die Erscheinungen aufhängen könnten; da am Ufer des Ozeans, in dem die Dinge schwimmen, keiner jener starken Ringe mehr übrigbleibt, an dem die Schiffsleute ihre Fahrzeuge mit dem Tau festzumachen pflegten.

Bis hierher verdient die Relativitätstheorie ihren Namen.

Aber nun taucht etwas auf, ihr zum Trotz und wie zum Hohn auf ihren Namen, und doch im Zusammenhang mit ihr, etwas, das in der Außenwelt ein unabhängiges, fest bestimmtes Dasein zu haben scheint, etwas Objektives, eine absolute Wirklichkeit. Das ist das Intervall der Ereignisse, das durch alle Schwankungen der Dinge hindurch beständig und unveränderlich bleibt bei aller unendlichen Verschiedenheit der Gesichtspunkte, bei aller Beweglichkeit der Ausgangspunkte.

Aus diesem Datum, das, philosophisch geredet, in merkwürdiger Weise die innersten Eigenschaften wieder hervortreten läßt, die man am alten absoluten Raum, an der alten absoluten Zeit so sehr tadelte, entwickelt sich in der Tat der ganze konstruktive Teil der Relativität, der Teil, der zu den glänzenden Bestätigungen geführt hat, von denen wir sprachen.

So scheint die Relativitätstheorie, sofern sie ein wertvolles wissenschaftliches Denkmal ist, ein konstruktives Werkzeug, ein Instrument für Entdeckungen, ihren Namen, ja ihren Ursprung zu verleugnen. Sie ist die Theorie eines neuen Absoluten: des Intervalls, das sich in den geodätischen Linien des vierdimensionalen Weltalls darstellt. Sie ist eine neue absolute Theorie. Wieder zeigt sich die alte Wahrheit, daß man selbst in der Wissenschaft nichts auf die reine Verneinung aufbaut. Um zu schaffen, muß man bejahen.

Die Relativitätstheorie hat glänzende Siege errungen, die

von dem majestätischen Siegel der Tatsachen sanktioniert wurden. Höchst erstaunliche Beispiele dafür haben wir in früheren Kapiteln gegeben. Nun aber sagen, daß diese Theorie wahr sei, weil ihre Ankündigung zukünftiger Erscheinungen nachträglich sich bewahrheitet, das hieße doch sie von einem eng pragmatistischen Standpunkt aus beurteilen. Es hieße auch — und hier liegt eine wirkliche Gefahr vor — den Weg versperren für den Drang des Denkens anderen Bahnen zu, auf denen auch noch Blumen zu pflücken sind. Hüten wir uns davor!

Es gilt also — trotz ihren Erfolgen, ja wegen ihrer Erfolge, den Scheinwerfer der Kritik auf die Grundlagen der neuen Lehre zu richten. Als Cäsar aufs Kapitol fuhr, mußte er hören, wie die Soldaten neben seinem Triumphwagen über seine Wunderlichkeiten scherzten und seinen Übermut dämpften. So muß auch die Relativitätstheorie, so prächtig sie auf ihrer Triumphstraße einherfährt, sich bewußt sein, daß sie ihre Schranken, vielleicht auch daß sie ihre Schwächen hat.

Ehe wir indessen die Sonde ansetzen, ehe wir sie diesem grellen Licht aussetzen, drängt sich eine Bemerkung auf.

Wie es sich auch verhalten mag mit den Unsicherheiten der physikalischen Theorien, mit der ewigen, schicksalsmäßigen Unvollkommenheit der Wissenschaft, eines muß hier festgestellt werden: die wissenschaftlichen Wahrheiten sind die bestbegründeten, die sichersten, die am wenigsten zweifelhaften aller Wahrheiten, die wir über die Außenwelt zu erreichen vermögen. Wenn die Wissenschaft uns die Natur der Dinge nicht ganz entschleiern kann, so gibt es doch nichts, das uns so über sie aufklärt wie die Wissenschaft. Die Wahrheiten des Gefühls, des Glaubens, der Intuition sind unzersetzbar für die wissenschaftliche Wahrheit,

solange sie Wahrheiten der Innenwelt bleiben; sie gehören einer anderen Ebene an.

Wollten sie aber sich anmaßen, auch die Probleme der Außenwelt zu meistern — und das wäre der einzige Grund ihrer Schwäche —, von dem Augenblick an sind sie der sinnenfälligen Wirklichkeit, der wissenschaftlichen Untersuchung der Wahrheit unterstellt.

Es ist also ein Widersinn, den angeblichen »Bankrott der Wissenschaft« der Gewißheit entgegenhalten zu wollen, die andere Fächer uns über die Außenwelt bringen. Der Bankrott der einen zieht den der anderen nach sich. Solange es sich nicht mehr um die stille Oase handelt, in der die feindlichen Wahrheiten des Gefühls blühen, sondern um die dürre, schlecht erforschte Wüste der Außenwelt, sind die wissenschaftlichen Daten die Grundlage aller anderen. Die Erschütterung der einen bedeutet auch eine Erschütterung der anderen. Ein Stoß mit dem Sturmbock ins Erdgeschoß, der dieses zum Einsturz bringt, wirft mit unfehlbarer Sicherheit auch die anderen Stockwerke ein.

Nichts in Wahrheit kündigt hienieden so sehr die mystische Gegenwart des Göttlichen an wie diese ewige unverbrüchliche Harmonie, welche die Erscheinungen verbindet und die durch die wissenschaftlichen Gesetze ausgedrückt wird. Die Wissenschaft, die uns das weite Weltall als ein Geordnetes zeigt, zusammenhängend, harmonisch, geheimnisvoll geeinigt, gegliedert wie eine gewaltige, stumme Symphonie, beherrscht vom Gesetz und nicht von der Willkür, durch unausweichbare Gesetze und nicht von privaten Willensbeschlüssen, diese Wissenschaft — ist sie nicht letztlich eine Offenbarung?

Da muß und wird die notwendige Versöhnung liegen zwischen den Geistern, die sich an die sinnenfällige Wirklichkeit halten,

und denjenigen, die unter der Gewalt des metaphysischen Geheimnisses stehen.

Den Bankrott der Wissenschaft verkünden, wenn das etwas anderes bedeutet als die menschliche Schwachheit verkünden, an der — ach! — niemand zweifelt, das heißt in Tat und Wahrheit etwas vom Göttlichen lästern, den Teil des Göttlichen, der unseren Sinnen zugänglich ist, den uns die Wissenschaft enthüllt.

Alles in allem: die ganze Einsteinsche Synthese hängt ab von dem Ergebnis des Michelsonschen Versuchs oder wenigstens von einer besonderen Auslegung dieses Ergebnisses.

Die Erscheinung der Aberration der Sterne beweist, daß das Medium, das ihr Licht bis zu unserem Auge fortpflanzt, nicht an der Fortbewegung der Erde um die Sonne teilnimmt. Dieses Medium heißen die Physiker den Äther. Lord Kelvin, der in gerechter Ehrung in Westminster unter der Grabplatte ruht, die neben der Newtons liegt, betrachtete mit Recht das Dasein des zwischen den Sternen befindlichen Äthers für ebensogut bewiesen wie das Dasein der Luft, die wir einatmen; denn ohne dieses Medium würde die Sonnenwärme, diese Mutter und Ernährerin alles irdischen Lebens, gar nicht zu uns dringen.

In der Theorie der beschränkten Relativität erklärt Einstein, wie wir sahen, die Erscheinungen, ohne den Äther eine Rolle spielen zu lassen, oder wenigstens ohne die Bewegungseigenschaften, die man gemeinhin dieser Substanz zuschreibt. Mit anderen Worten, die beschränkte Relativität behauptet den Äther nicht, leugnet ihn aber auch nicht; sie sieht von ihm ab.

Aber diese Gleichgültigkeit bezüglich des Äthers, diese Nichtschätzung verschwindet in der allgemeinen Relativitätstheorie. Wir haben in einem früheren Kapitel gesehen, daß die Bahnen

der gravitierenden Körper und des Lichts nach dieser Theorie sich unmittelbar aus einer besonderen Krümmung und aus dem nichteuklidischen Charakter des Mediums erklären, das im leeren Raum sich in der Nähe der massiven Körper befindet, mit anderen Worten des Äthers. Obwohl seine Bewegungseigenschaften für Einstein nicht das sind, was sie für die Klassiker sind, wird der Äther doch das Substrat für alle Geschehnisse des Weltalls. Er bekommt seine Bedeutung, seine objektive Wirklichkeit wieder. Er ist das stetige Medium, in dem die raumzeitlichen Ereignisse sich entwickeln.

Also erkennt die allgemeine Theorie Einsteins das objektive Dasein des Äthers an unbeschadet des neuen Verhaltens den Bewegungstatsachen gegenüber, das sie ihm zuschreibt.

Die Aberration der Sterne zeigt dieses Medium als unbeweglich mit Bezug auf die Fortbewegung der Erde in ihrer Bahn.

Das negative Ergebnis des Michelsonschen Versuchs dagegen weist eher darauf hin, daß er an der Bewegung der Erde teilnimmt. Die Fitzgerald-Lorentzsche Hypothese sucht diesen Widerstreit zu versöhnen durch die Annahme, daß der Äther tatsächlich nicht an der Translation der Erde teilnimmt; aber daß alle Körper, die in ihm von der Stelle rücken, im Sinn dieser Verschiebung eine Verkürzung erleiden. Diese wächst mit ihrer Schnelligkeit im Äther, was das negative Ergebnis Michelsons erklärt.

Die Lorentzsche Erklärung erschien Einstein unstatthaft wegen einiger Unwahrscheinlichkeiten, auf die wir hinwiesen und besonders weil sie im Weltall das Dasein eines Systems von bevorrechteten Beziehungen voraussetzt, in dem man eine Auferstehung des absoluten Raums Newtons sehen kann. Kraft des Grundsatzes, daß alle Gesichtspunkte relativ sind, gibt Einstein

nicht zu, daß es im Weltall bevorrechtete Beobachter gibt — solche also, die unbewegt im Äther sind —, die die Dinge sehen würden wie sie sind, während für jeden anderen Beobachter diese Dinge entstellte Formen hätten.

Sodann behauptet Einstein, indem er ruhig die Lorentzsche Verkürzung und die Formeln, die sie ausdrücken, beibehält, daß diese Verkürzung zwar da ist, aber nur ein Schein, nur eine Art optischer Illusion, und daß sie von dem Umstand herkommt, daß das Licht, das uns die Gegenstände darstellt, sich nicht augenblicklich fortpflanzt, sondern mit endlicher Geschwindigkeit. Diese Fortpflanzung des Lichts vollzieht sich gesetzlich in der Art, daß der scheinbare Raum und die scheinbare Zeit genau den Lorentzschen Formeln entsprechend entstellt erscheinen. Das ist die Grundlage der speziellen Relativität Einsteins.

So sind also die beiden ersten möglichen Erklärungen des negativen Ergebnisses des Michelsonschen Versuchs die folgenden:

1. Es gibt eine Verkürzung der beweglichen Gegenstände im unbeweglichen Äther, dieser festen Unterlage der Erscheinungen. Diese Verkürzung ist wirklich, sie wächst mit der Schnelligkeit des beweglichen Körpers relativ zum Äther. Das ist die Lorentzsche Erklärung.

2. Es gibt eine Verkürzung der beweglichen Gegenstände relativ zu jedem beliebigen Beobachter. Diese Verkürzung ist nur ein Schein, der mit den Gesetzen der Fortpflanzung des Lichts zusammenhängt. Sie wächst mit der Schnelligkeit des beweglichen Gegenstands relativ zum Beobachter. Das ist die Einsteinsche Erklärung.

Aber es gibt noch mindestens eine dritte mögliche Erklärung. Sie führt neue, sogar ungewohnte, aber keineswegs ungereimte

Hypothesen ein. Es gilt übrigens besonders von der Physik, daß das Wahre manchmal nicht wahrscheinlich ist. Sie wird zeigen, daß man auch von der Lorentzschen Hypothese absehen und doch das Michelsonsche Ergebnis befriedigend erklären kann, anders als Einstein mit seiner Auslegung es versuchte.

Diese dritte erklärende Hypothese ist die folgende: Jeder materielle Körper zieht den Äther, der mit ihm verbunden ist, wie eine Art Atmosphäre mit. Außerdem aber existiert in dem leeren Raum zwischen den Sternen ein unbeweglicher Äther, der gleichgültig ist gegen die Bewegung der materiellen Körper, die sich in ihm bewegen, und den wir den Überäther heißen wollen, um ihn von dem mit den Körpern verbundenen Äther zu unterscheiden. Dieser Überäther füllt den ganzen leeren Raum zwischen den Sternen und legt sich in der Nähe der Gestirne über den Äther, den diese mit sich reißen. Der Äther und der Überäther durchdringen sich gegenseitig, wie sie die Materie durchdringen, und die Schwingungen, die sie vermitteln, pflanzen sich selbständig in ihnen fort. Wenn ein materieller Körper Wellen in den umgebenden Äther hinaussendet, so sind diese relativ zu ihm mit der gleichbleibenden Geschwindigkeit des Lichts versehen. Aber wenn sie die verhältnismäßig dünne Schicht des Äthers, der mit diesem materiellen Körper verbunden ist und der allmählich mit dem Überäther verschwindet, durchlaufen haben, so vollzieht sich ihre Fortpflanzung im Überäther, und ihm passen sie schrittweise ihre Geschwindigkeit an.

So hat ein Schiff, das über den Genfer See mit einer gewissen Geschwindigkeit fährt, in der Mitte des Sees diese Geschwindigkeit relativ zu der engen von der Rhone gebildeten Strömung, dann paßt es sie dem unbewegten See an.

So ist es auch mit den Lichtstrahlen der Sterne; obwohl sie

von Gestirnen ausgehen, die auf uns zu oder von uns weg eilen. Sie werden doch immer mit derselben Geschwindigkeit zu uns kommen, und zwar mit der Durchschnittsgeschwindigkeit, welche der Überäther ihnen aufzwingt. So werden anderseits die Strahlen der Sterne, die in unsere Fernrohre gelangen, durch den Überäther zu uns hin fortgepflanzt, ohne daß die dünne, mit der Erde bewegliche Ätherschicht diese Fortpflanzung stören könnte.

Nach diesen Hypothesen lassen sich alle Tatsachen erklären und vereinigen:

1. die Aberration der Sterne, weil die Strahlen, die uns von ihnen zukommen, uns unverändert durch den Überäther übermittelt werden, 2. das negative Ergebnis des Michelsonschen Versuchs, weil das Licht, das wir im Laboratorium erzeugen, sich in dem von der Erde mitgerissenen Äther, in dem es entstanden ist, fortpflanzt, 3. die Tatsache, daß die Strahlen der Sterne ohne Rücksicht auf ihre Annäherung oder Entfernung uns mit der gemeinsamen Geschwindigkeit zukommen, die sie im Überäther kurz nach ihrer Ausstrahlung erlangt haben.

So seltsam diese Erklärung erscheinen mag, sie ist nicht ungereimt und wirft keine Schwierigkeit auf, die sie nicht zu überwinden vermöchte. Sie beweist, wenn der Michelsonsche Versuch eine Art Sackgasse darstellt, daß es noch andere Auswege aus ihr gibt als die Einsteinsche Theorie.

Wir fassen zusammen: Um den Schwierigkeiten zu entgehen, den scheinbaren Widersprüchen, die sich in der Erfahrung ergeben, dem Widerstreit zwischen der Aberration und dem Michelsonschen Ergebnis, stehen uns drei Wege offen, die auf folgendes Entweder-Oder hinauslaufen:

1. Die Verkürzung der Körper durch die Geschwindigkeit ist wirklich (Lorentz).

2. Die Verkürzung der Körper durch die Geschwindigkeit ist nur ein Schein, der mit den Gesetzen der Fortpflanzung des Lichts zusammenhängt (Einstein).

3. Die Verkürzung der Körper durch die Geschwindigkeit ist weder Wirklichkeit noch Schein. Sie existiert nicht (Hypothese des mit dem Äther verbundenen Überäthers).

Das beweist, daß die Einsteinsche Erklärung der Erscheinungen uns keineswegs von den Tatsachen aufgenötigt wird, oder wenigstens, daß sie uns nicht gebieterisch aufgenötigt ist und nicht so, daß jede andere ausgeschlossen wäre.

Ist sie wenigstens durch die Vernunft aufgenötigt, durch die Grundsätze, durch den Evidenzcharakter seiner rationellen Vordersätze, weil sie nicht, wie die andere, dem gesunden Menschenverstand und unseren geistigen Gewohnheiten anstößig ist?

Man könnte das zunächst meinen, wenn man sie mit der Lorentzschen Lehre vergleicht; dabei werde ich, um diese Darlegung nicht zu verwickelt zu gestalten, die dritte der soeben skizzierten Theorien, die Theorie des Überäthers, vorläufig beiseite lassen.

Was an der Lorentzschen Hypothese der wirklichen Verkürzung anstößig erschien, das war in erster Linie der Umstand, daß diese Verkürzung nur von der Geschwindigkeit der Gegenstände abhing und keineswegs von ihrer Natur; der Umstand, daß sie gleich ist für alle, ihre Substanz, ihre chemische Zusammensetzung, ihr physischer Zustand mögen sein, wie sie wollen.

Bei genauerem Nachdenken erscheint dieser Umstand weniger anfechtbar. Wissen wir nicht in der Tat, daß die Atome alle aus denselben Elektronen gebildet sind, die sich nur in der Anordnung und in der Atomzahl unterscheiden, die allein die Unterschiede der Körper bewirken?

Wenn nun die aller Materie gemeinsamen Elektronen miteinander, ebenso wie ihre relativen Entfernungen, eine von der Geschwindigkeit herrührende Verkürzung erleiden, so ist der Gedanke schließlich nicht allzu unnatürlich, daß das Ergebnis für alle Gegenstände völlig gleich sein kann. Wenn die Wärme ein Eisengitter von gegebener Länge ausdehnt, so wird der Betrag, um den eine Temperatur von 100 Grad dieses Gitter erhöht und verbreitert, derselbe sein, ob dieses nun 10 oder 100 Stahlstangen auf das laufende Meter zählt, vorausgesetzt, daß sie völlig gleich sind.

Hier sitzt also die Unwahrscheinlichkeit nicht, die die Relativisten dazu geführt hat, die Lorentzsche Theorie zu verwerfen. Der Grund liegt vielmehr in den Prinzipien der Theorie selbst: es ist der Umstand, daß sie in der Natur ein System bevorrechteter Beziehungen zuläßt, den unbewegten Äther, relativ zu dem die Körper ihren Ort verändern.

Untersuchen wir das etwas genauer!

Man hat gesagt, der unbewegliche Äther von Lorentz sei schließlich eine Auferstehung des von den Relativisten so scharf angegriffenen absoluten Raums von Newton. Das ist keineswegs gewiß. Wenn unser Sternenweltall, wie wir in einem früheren Kapitel angenommen haben, nur eine riesenhafte Ätherblase wäre, die in einem ätherlosen Raum umherschweift unter anderen Ätherblasen, die dem Menschen ewig unerkennbar bleiben, so ist klar, daß der mit Äther gefüllte Tropfen, der unser Weltall darstellt, sehr wohl in dem ihn umgebenden Raum, der der richtige absolute Raum wäre, in Bewegung sein kann.

Von diesem Standpunkt aus kann der Lorentzsche Äther nicht mit dem absoluten Raum gleichgesetzt werden. Diese Gleichsetzung vollziehen kommt auf die Behauptung hinaus, daß der

von Newton so benannte absolute Raum diesen Namen vielleicht nicht verdient. Wenn der Newtonsche Raum nur das physische Kontinuum ist, in dem sich die Ereignisse unseres besonderen Weltalls abspielen, so ist er nichts weniger als absolut unbeweglich.

Alles, was man an Newton aussetzt, kommt in diesem Fall darauf hinaus, daß man ihm den Gebrauch eines ungeeigneten Ausdrucks vorwirft, daß er nämlich absolut genannt hat, was nur bevorrechtet ist für ein gegebenes Weltall.

Das wäre ein grammatischer Tadel, und Vaugelas* allein war noch nie imstande, die Wissenschaft umzustürzen.

Aber die Relativisten, oder wenigstens die verstockten Relativisten, die man Einsteinianer heißt, begnügen sich damit nicht. Ihnen ist das nicht genug, daß der Newtonsche Raum mit allen seinen Vorrechten vielleicht nicht der absolute Raum ist.

Unsere Auffassung des Weltalls als einer Ätherinsel in Bewegung würde sehr wohl die Vorrangsrechte des Newtonschen Raums und den Agnostizismus, der uns jeden Zugang zum Absoluten versagt, miteinander vereinigen können. Aber das genügt den Einsteinianern nicht. Was sie im Sinn haben, ist: den Newtonschen Raum, auf dem die klassische Mechanik sich aufbaut, entschlossen aller seiner Vorrechte zu berauben. Sie wollen diesen Raum in Reih' und Glied einordnen, sie wollen ihn zwingen, ein Seitenstück aller erdenklichen Räume zu sein, die sich relativ zu ihm willkürlich bewegen: weiter nichts.

Vom agnostischen, vom skeptischen, zweiflerischen Standpunkt aus ist diese Einstellung gut und schön. Aber wir haben im Lauf

* Französischer Grammatiker des 17. Jahrhunderts.

dieses Bandes nun genug Gelegenheit gehabt, die gewaltige theoretische Synthese Einsteins und die überraschenden Bestätigungen, die sie findet, zu bewundern, um das Recht zu haben, jetzt unsere Vorbehalte zu machen. Man kann sogar die Verneinungen der Zweifler in Zweifel ziehen, denn wenn man genau zusieht, sind auch sie Behauptungen.

Wir sind der Meinung, daß man angesichts der philosophischen Einstellung der Einsteinianer, angesichts ihres »absoluten Relativismus«, wie ich ihn nennen möchte, das Recht hat, sich etwas zu wehren und folgendes zu sagen.

Ja, alles ist möglich, oder wenigstens viele Dinge sind möglich, aber nicht alle sind wirklich. Ja, wenn ich in eine unbekannte Wohnung eintrete, kann die Uhr im Salon rund, viereckig oder achteckig sein. Aber wenn ich über die Schwelle getreten bin und gesehen habe, daß die Uhr viereckig ist, habe ich das Recht zu sagen: sie ist viereckig; sie hat das Vorrecht, viereckig zu sein; es ist eine Tatsache, daß sie weder rund noch achteckig ist.

Ebenso in der Natur das physische Kontinuum, das wie ein Gefäß die Erscheinungen des Weltalls aufnimmt, könnte relativ zu mir — solange ich es nicht beobachtet habe — ganz beliebige Bewegungen und Formen haben. Aber tatsächlich ist es, was es ist — und es kann nicht zu gleicher Zeit Verschiedenes sein.

Man kann also unter den Möglichkeiten in der Außenwelt, die wir uns denken können, eine bevorrechtete Möglichkeit auffassen, diejenige, welche tatsächlich verwirklicht ist, diejenige, welche existiert.

Der vollkommene Relativismus der Einsteinianer kommt darauf hinaus, das Weltall sich als so fremd für uns vorzustellen, daß wir nicht in der Lage sind, das Wirkliche und das Mögliche über Raum und Zeit darin zu unterscheiden. Die Newtonianer

dagegen behaupten, daß der wirkliche Raum und die wirkliche Zeit sich uns durch besondere Zeichen kundtun. Wir werden diese Zeichen später untersuchen.

Die reinen Relativisten haben mit einem Wort versucht, sich der Notwendigkeit zu entziehen, eine unzugängliche Wirklichkeit anzunehmen.

Das ist ein Standpunkt, der zugleich viel bescheidener und viel vermessener ist als der der Newtonianer, der Absolutisten.

Bescheidener, weil wir nach dem Einsteinianer gewisse Dinge nicht erkennen können, denen der Absolutist dagegen beikommen zu können glaubt: die wirkliche Zeit und den wirklichen Raum. Vermessener, weil der Relativist behauptet, daß es keine andere Wirklichkeit gibt als diejenige, die der Beobachtung zugänglich ist. Für ihn ist das Unerkennbare und das Nichtexistierende fast gleichbedeutend. Daher hat Henri Poincaré, der vor Einstein der tiefste der Relativisten war, unaufhörlich wiederholt, daß die den absoluten Raum und die absolute Zeit betreffenden Fragen »keinen Sinn« haben.

Kurz die Einsteinianer machen das Wort August Comtes zu ihrem Wahlspruch: »Alles ist relativ und das allein ist absolut.«

Newton dagegen, dessen raumzeitliche Voraussetzungen Henri Poincaré so energisch ablehnte und mit ihm die klassische Wissenschaft, hat eine Einstellung, die Newton selbst wunderbar gekennzeichnet hat, wenn er schrieb: »Ich bin nur ein Kind, das am Ufer spielt und sich damit ergötzt, von Zeit zu Zeit einen Kieselstein zu finden, der glätter ist, und eine Muschel, die schöner ist als die anderen, während der große Ozean der Wahrheit vor mir immer unerforscht bleiben wird.« Newton behauptet, daß dieser Ozean unerforscht ist, nur behauptet er auch, daß er existiert. Und aus der Form der gefundenen Muscheln leitet er gewisse

Eigenschaften dieses Ozeans ab, und besonders diejenigen, die er die absolute Zeit und den absoluten Raum heißt.

Einsteinianer und Newtonianer sind einig in dem Gedanken, daß die Außenwelt heute von der Wissenschaft noch nicht völlig zu verarbeiten ist. Nur hat ihr Agnostizismus verschiedene Grenzen. Die Newtonianer glauben, so fremd uns die Welt sein möge, so sei das doch nicht so sehr der Fall, daß der wirkliche Raum und die wirkliche Zeit uns unzugänglich wären. Die Einsteinianer sind anderer Meinung. Was sie trennt, ist nur eine Frage des größeren oder geringeren Grades von Skeptizismus.

Der ganze Streit kommt also auf einen Grenzstreit zwischen zwei Agnostizismen hinaus.

9

Einstein oder Newton?

Neueste Erörterung des Relativismus in der Akademie der Wissenschaften • Die Kennzeichen des bevorrechteten Raums von Newton • Der Kausalitätsgrundsatz Grundlage der Wissenschaft • Prüfung der Einwände des Herrn Painlevé • Newtonsche Beweisgründe und relativistische Ausflüchte • Die Gravitationsformel des Herrn Painlevé • Fruchtbarkeit der Einsteinschen Lehre • Zwei Weltauffassungen • Schluß

Worin bestehen die besonderen Zeichen, an denen die Newtonsche Naturauffassung den bevorrechteten Raum erkennt, der ihr, mit Ausschluß aller anderen, als der wirkliche, eigentliche Rahmen der Erscheinungen erscheint und den Newton den absoluten Raum nennt?

Diese Zeichen, diese Kriterien liegen, wenn auch unausgesprochenermaßen, der Entwicklung der klassischen Wissenschaft zugrunde. Trotzdem waren sie bei den durch das Einsteinsche System veranlaßten Erörterungen etwas im Dunkel geblieben.

Indem er einen Augenblick andere, vielleicht weniger vornehme Aufgaben liegen ließ, trat Paul Painlevé vor die Akademie der Wissenschaften und stellte die alten, aber immer noch starken Gründe wieder in helles Licht, die der Newtonschen Weltauffassung ihre Kraft verliehen haben.

Der absolute Raum, die absolute Zeit Newtons und Galileis, nennen wir sie künftig den bevorrechteten Raum, die bevor-

rechtete Zeit, um uns nicht den im Grunde wohlberechtigten metaphysischen Einwänden auszusetzen, welche die Bezeichnung »absolut« hervorrufen könnte.

Warum gründen sich die klassische Wissenschaft, die Mechanik Galileis und Newtons auf den bevorrechteten Raum und die bevorrechtete Zeit? Warum beziehen sie alle Erscheinungen auf diese einzigen festen Punkte, die nach ihrer Ansicht mit der Wirklichkeit übereinstimmen? Wegen des Kausalitätsgrundsatzes.

Diesen Grundsatz kann man folgendermaßen fassen. Völlig gleiche Ursachen bringen völlig gleiche Wirkungen hervor. Das bedeutet, daß die Anfangsbedingungen eines Ereignisses seine späteren Ausgestaltungen fest bestimmen. Es ist im Grunde die Behauptung des Determinismus der Ereignisse, ohne den die Wissenschaft unmöglich ist.

Gewiß kann man auch daran herumkritteln. Bedingungen, die gegebenen Anfangsbedingungen völlig gleich sind, können zu einer anderen Zeit und an anderem Ort nie wiederhergestellt oder wieder aufgefunden werden. Es gibt immer einen Umstand, der nicht mehr ganz der gleiche ist, zum Beispiel die Tatsache, daß zwischen zwei Versuchen der Spiralnebel der Andromeda sich uns um einige tausend Kilometer genähert hat. Und wir können eben nicht auf den Spiralnebel der Andromeda einwirken.

Glücklicherweise — und damit ist alles gerettet — haben die fernen Körper, wie es scheint, auf unsere Versuche nur eine Wirkung, die wir nicht zu berücksichtigen brauchen, und darum können wir diese wiederholen.

Wenn wir zum Beispiel heute 1 Gramm rauchende Schwefelsäure in 10 Gramm zehnprozentige Natronlösung bringen, so bringen diese Körper in derselben Zeit denselben Betrag des-

selben schwefelsauren Natrons hervor, wie sie es im Jahr vorher getan hätten, unter denselben Bedingungen der Temperatur und des Drucks.

Das bedeutet, daß der Kausalitätsgrundsatz (gleiche Ursachen, gleiche Wirkungen) immer bestätigt wird und nie versagen kann. Dieser Grundsatz ist also eine Erfahrungswahrheit, aber er drängt sich außerdem unserem Geist mit unwiderstehlicher Gewalt auf.

Selbst den Tieren drängt er sich auf: Das Sprichwort »Die angebrühte Katze fürchtet sogar das kalte Wasser« beweist es. Es beweist auch, daß man diesen Grundsatz mißbräuchlich anwenden kann. Jedenfalls ist nicht bloß die Wissenschaft, sondern überhaupt das ganze Leben der Menschen und der Tiere auf ihm begründet.

Die Folge aus diesem Grundsatz ist, daß, wenn die Anfangsbedingungen einer Bewegung eine Symmetrie aufweisen, diese in der Bewegung sich wieder aufzeigen läßt. Herr Paul Painlevé hat das nachdrücklich betont im Lauf der neuesten Erörterung über den Relativismus in der Akademie der Wissenschaften in Paris. Aus dieser Bemerkung läßt sich namentlich auch das Trägheitsprinzip ableiten: Ein frei sich selbst überlassener Körper wird fern von jeder materiellen Masse unbewegt bleiben oder eine gerade Linie beschreiben aus Gründen der Symmetrie.

Er wird in der Tat eine Gerade beschreiben für einen gewissen Beobachter (oder für Beobachter, die mit gleichförmigen Geschwindigkeiten ausgestattet sind relativ zum ersten). Die Newtonianer sagen, daß der Raum dieser Beobachter bevorrechtet ist. Für einen anderen Beobachter dagegen, der relativ zu diesem mit einer beschleunigten Geschwindigkeit ausgestattet ist, ist die Bahn des bewegten Körpers eine Parabel und nicht mehr sym-

metrisch. Also ist der Raum dieses neuen Beobachters nicht der bevorrechtete Raum.

Mir scheint, daß die Relativisten darauf antworten können: Ihr habt nicht das Recht, die Anfangsbedingungen für einen gegebenen Beobachter zu bestimmen, dann die darauffolgende Bewegung für einen anderen, der mit beschleunigter Geschwindigkeit ausgestattet ist. Wenn ihr auch nur Anfangsbedingungen relativ zu diesem bestimmt, so ist der bewegliche Körper in dem Augenblick, da man ihn sich selbst überläßt, nicht frei für diesen Beobachter, sondern er fällt in einem Gravitationsfeld. Kein Wunder also dann, daß ihm die eintretende Bewegung beschleunigt und unsymmetrisch erscheint. Der Kausalitätsgrundsatz versagt nicht, weder für den einen noch für den anderen der beiden Beobachter.

Man kann das bevorrechtete System auch anders definieren, und zwar so: es ist dasjenige, relativ zu dem das Licht sich geradlinig fortpflanzt in einem isotropen Medium. Aber in diesem Fall verschieben sich für einen Beobachter auf der Erde, die sich dreht, die Strahlen der Sterne spiralförmig, und die Newtonianer würden daraus folgern, daß die Erde sich dreht relativ zu ihrem bevorrechteten Raum. Die Einsteinianer werden erwidern, daß der Raum, in dem die Strahlen wandern, nicht isotrop ist und daß sie von der geraden Linie abgelenkt werden durch das drehende Gravitationsfeld, das die Zentrifugalkraft der Umdrehung der Erde bewirkt. Es gibt für sie immer eine Auskunft, die den Kausalitätsgrundsatz unangetastet läßt.

Es scheint also schwer zu sein, das Dasein des bevorrechteten Systems unwiderleglich darzutun, wenn man vom Kausalitätsgrundsatz ausgeht, und jeder bleibt in seinen Stellungen.

Dafür findet sich eine Kraft der Evidenz, von durchdringendem und überzeugendem Scharfsinn im zweiten Teil der kritischen Einwendungen Painlevés gegen die Grundlagen der Einsteinschen Lehre.

Fassen wir den Beweisgang dieses Gelehrten zusammen! Jedem beliebigen Beziehungssystem, sagt er zu den Einsteinianern, streitet ihr jedes Vorrecht ab. Aber wenn ihr aus euren allgemeinen Gleichungen durch Berechnung das Gravitationsgesetz ableiten wollt, so könnt ihr das nur tun, und ihr tut es in Wahrheit nur, indem ihr kaum verhüllte Newtonsche Hypothesen und bevorrechtete Beziehungsachsen einführt. Ihr kommt zu dem Ergebnis eurer Berechnung nur, indem ihr Raum und Zeit reinlich trennt wie Newton und indem ihr eure gravitierenden bewegten Körper auf rein Newtonsche bevorrechtete Achsen bezieht, für die gewisse Symmetriebedingungen verwirklicht sind.

Die Kritik Painlevés muß man mit der Kritik Wiecherts zusammennehmen, der verschiedene andere Hypothesen, die sich in die Berechnungen Einsteins einschlichen, ausgespürt hat.

Kurz, dieser scheint sich nicht vollständig freigemacht zu haben von den Newtonschen Voraussetzungen, die er doch verwirft. Er verschmäht sie nicht so sehr, wie man glauben könnte; er scheut sich nicht, sie bei Gelegenheit zu Hilfe zu rufen, wenn es sich darum handelt, die Rechnung schlüssig zu gestalten.

Das heißt doch eigentlich, das wieder in gewissem Sinn anbeten, was man verbannt hat.

Um sich aus der Verlegenheit zu ziehen, werden die Einsteinianer sicher antworten, wenn sie im Lauf ihrer Entwicklungen Newtonsche Achsen einführen, so geschehe es, um das Ergebnis der Berechnung so zu gestalten, daß es vergleichbar sei

mit den experimentellen Messungen. Die so in die Gleichungen eingeführten Achsen haben für die Relativisten das alleinige Vorrecht, daß sie diejenigen sind, auf die die Experimentatoren ihre Messungen beziehen. Aber man wird zugeben, daß das kein geringfügiges Vorrecht ist.

Das ist nicht alles. Das allgemeine Relativitätsprinzip besagt im Grunde folgendes: Alle festen Punkte, alle Beziehungssysteme sind gleichwertig für den Ausdruck der Naturgesetze, und diese Gesetze sind Invarianten, auf welches Beziehungssystem man sie auch beziehen mag. Zwischen den Gegenständen der Außenwelt gibt es Beziehungen, die unabhängig von dem sind, der sie betrachtet, und namentlich auch von seiner Geschwindigkeit. Wenn so ein Dreieck auf ein Papier gezeichnet ist, so ist an diesem Dreieck etwas, das sein kennzeichnendes Merkmal bildet und das völlig gleich ist, mag sich der Beobachter an dem Papier sehr rasch oder sehr langsam oder mit beliebiger Geschwindigkeit oder in beliebiger Richtung vorbeibewegen.

Herr Painlevé bemerkt nicht ohne Grund, daß in dieser Form das Prinzip eine Art von Binsenwahrheit ist. Das Wort ist hart. Und trotzdem drückt es eine sichere Tatsache aus. Die wirklichen Beziehungen der äußeren Gegenstände können keine Änderung erleiden durch den Standpunkt des Beobachters.

Einstein wird antworten, es sei schon etwas, ein Sieb zu liefern, durch das die Gesetze und Formeln, die zur Darstellung der erfahrungsmäßig beobachteten Erscheinungen dienen, durchgehen müssen, ein Kriterium zu bieten, dem sie genügen müssen, wenn sie als genau und richtig anerkannt werden sollen. Das ist richtig. Das Newtonsche Gesetz in seiner klassischen Gestalt genüge nicht diesem durch die Bedingung der Unveränderlichkeit

des »Intervalls« ergänzten Kriterium. Das beweist, daß es nicht gar so evident war. Es kommt vor, daß eine gestern noch verkannte Wahrheit heute eine Binsenwahrheit wird. Um so besser.

Indem sie eine der Bedingungen ausdrückt, der die Naturgesetze genügen müssen, erwirbt die Relativitätstheorie mindestens das, was man in der philosophischen Schulsprache einen heuristischen Wert heißt.

Es steht darum nicht weniger fest, wie Herr Painlevé mit vollkommener Kraft und Klarheit zeigte, daß das so aufgefaßte allgemeine Relativitätsprinzip nicht genügen kann, genau bestimmte Gesetze zu liefern. Es wäre vollkommen vereinbar mit einem Gravitationsgesetz, in dem die Anziehung stattfände im umgekehrten Verhältnis nicht des Quadrats, sondern der siebzehnten, der hundertsten, einer ganz beliebigen Potenz der Entfernung.

Um aus dem allgemeinen Relativitätsprinzip das genaue Anziehungsgesetz herauszuziehen, muß man die Einsteinsche Auslegung des Michelsonschen Ergebnisses hinzufügen, nämlich: daß relativ zu einem beliebigen Beobachter das Licht sich örtlich mit derselben Schnelligkeit nach allen Richtungen fortpflanzt. Man muß noch verschiedene Hypothesen hinzufügen, die Herr Painlevé als newtonisch in Anspruch nimmt.

Seiner kritischen Darlegung der Relativität hat Herr Painlevé einen wertvollen mathematischen Beitrag hinzugefügt, dessen Hauptergebnis folgendes ist: Man kann andere Gravitationsgesetze finden als das von Einstein aufgezeigte, die doch alle den Einsteinschen Bedingungen entsprechen.

Der gelehrte französische Geometer hat mehrere aufgezeigt, eines besonders, dessen von der Einsteinschen scharf sich abhebende Formel doch gleich dieser, und zwar mit Genauigkeit, die

Bewegung der Planeten, die Verschiebung der Sonnennähe Merkurs und die Ablenkung der Lichtstrahlen in der Nähe der Sonne erklärt.

Diese neue Formel entspricht einem Raum, der unabhängig von der Zeit ist, und sie führt nicht zu der Folgerung, die aus der Einsteinschen Formel sich ergibt in betreff der Verschiebung aller Spektralstreifen der Sonne zum Rot hin.

Die Bestätigung oder Nichtbestätigung dieser Folgerung aus der Einsteinschen Gleichung, deren — vielleicht unüberwindliche — Schwierigkeiten wir in einem früheren Kapitel aufgezeigt haben, gewinnt ein neues Gewicht.

Und merkwürdig, mehrere der von Painlevé gegebenen Gravitationsformeln führen im Gegensatz zu der Einsteinschen zu dem Schluß, daß der Raum euklidisch bleibt, wenn man sich der Sonne nähert, in dem Sinn, daß die Metermaßstäbe sich nicht notwendig verkürzen müssen.

Das alles glänzt am Horizont der Astronomie wie die Morgenröte eines neuen Geschichtsabschnitts, in der Beobachtungen von ungeahnter Genauigkeit hochfeine Kriterien liefern werden, die fähig sind, dem Gravitationsgesetz eine genauere und von Verschwommenheit freiere Form zu geben. Es gibt noch schöne Tage — oder vielmehr schöne Nächte für die Astronomen.

In bezug auf das Grundsätzliche wird der Streit weitergeführt werden. Letzten Endes wird es auf ein Zwiegespräch in der Art etwa des folgenden hinauskommen.

Der Newtonianer: Gestehen Sie zu, daß an einem Punkt des Weltalls, der von allen materiellen Massen sehr weit entfernt ist, ein sich selbst überlassener beweglicher Körper eine gerade Linie beschreiben muß? In diesem Fall erkennen Sie das

Dasein von bevorrechteten Beobachtern an; es sind diejenigen, für welche diese Linie eine Gerade ist. Es kann geschehen, daß für einen anderen Beobachter diese Linie eine Parabel ist. Also ist sein Gesichtspunkt falsch.

Der Relativist: Ja, ich gebe es zu, aber tatsächlich gibt es keinen Punkt des Weltalls, an dem die Wirkung entfernter materieller Massen gleich Null ist. Folglich ist Ihr frei sich selbst überlassener beweglicher Körper nur eine Abstraktion, und ich kann die Wissenschaft nicht auf eine Abstraktion gründen, deren Richtigkeit nicht nachweisbar ist. Das ganze Bestreben der Relativisten besteht darin, die Wissenschaft von allem zu befreien, was keinen experimentellen Sinn hat.

Was den Beobachter betrifft, der den fraglichen beweglichen Körper eine Parabelbahn beschreiben sieht, so wird er seine Beobachtung so auslegen, daß er sagt, der Körper befinde sich in einem Gravitationsfeld.

Der Newtonianer: Sie sind also zu der Annahme genötigt, daß weit weg von aller Materie, weit weg von allen Gestirnen das, was Sie ein Gravitationsfeld heißen, existieren kann, daß dieses variiert nach der Geschwindigkeit des Beobachters und daß es sehr intensiv sein kann trotz der Entfernung von den Sternen, ja sogar manchmal wachsen kann mit dieser Entfernung. Das sind seltsame, ungereimte Hypothesen.

Der Relativist: Sie sind seltsam, aber Sie sollen vorerst beweisen, daß sie ungereimt sind. Sie sind es weniger als der Versuch, einen vereinzelten und von jeder materiellen Masse unabhängigen Punkt zu lokalisieren und in Bewegung zu setzen.

Der Newtonianer: Ich meinerseits kann mir sehr wohl einen einzelnen materiellen Punkt im Universum vorstellen,

der eine gewisse Lage darin einnimmt und eine gewisse Geschwindigkeit hat.

Der Relativist: Ich keineswegs. Wenn ein solcher materieller Punkt existierte, so wäre es ungereimt und unmöglich, von seiner Lage und von seiner Bewegung zu sprechen. Dieser Punkt hätte weder eine Lage noch Bewegung noch Unbeweglichkeit. Alle diese Dinge können nur relativ zu anderen materiellen Punkten bestehen.

Der Newtonianer: Das ist nicht meine Ansicht.

Der unparteiische Beobachter: Um zu wissen, wer recht hat, müßte man einen Versuch an einem materiellen Punkt machen, der jedem Einfluß des übrigen Weltalls entzogen wäre. Können Sie diesen Versuch machen, meine Herren?

Der Newtonianer und der Relativist (miteinander): Leider nein!

Der Metaphysiker (kommt plötzlich herbei wie der dritte Spitzbube in der Fabel): In diesem Fall, meine Herren, möchte ich Ihnen nahelegen, daß Sie wieder zu Ihren Fernrohren, Ihren Laboratorien, Ihren Logarithmentafeln zurückkehren. Alles übrige ist meine Sache.

Der Newtonianer und der Relativist (miteinander): In diesem Fall sind wir durchaus sicher, daß wir nie etwas weiter darüber erfahren werden, als wir jetzt schon wissen und glauben.

Im übrigen kann man die Bedeutung der neuen Aufschlüsse, durch die das Relativitätsproblem infolge des Eingreifens Paul Painlevés in der Akademie der Wissenschaften aufgehellt wurde, kaum hoch genug veranschlagen. Die Nachwirkung wird ungeheuer und dauernd sein.

Ist damit die wunderbare Einsteinsche Synthese erledigt? Ist sie so erschüttert, daß sie zusammenbrechen muß unter den Disputen, Kritiken und Unsicherheiten, die wir in kurzem Überblick vorgeführt haben? Ich denke nicht.

Als Christoph Kolumbus Amerika entdeckte, hatten die leichtes Spiel, die ihm sagten, seine Voraussetzungen seien falsch gewesen, und wenn er nicht geglaubt hätte, nach Indien zu fahren, so hätte er nie ein neues Festland erreicht. Er hätte nach Art Galileis antworten können: »Und doch habe ich es entdeckt.«

Die Methode, die gute Ergebnisse gibt, ist immer gut.

Sobald es sich darum handelt, auf den Grund des Unbekannten zu tauchen, um Neues zu finden, sobald es sich darum handelt, das Wissen zu mehren und zu verbessern, heiligt der Zweck das Mittel.

Unter Hinweis auf die wie zu einer neuen Garbe festverbundenen Wissenschaften der Optik, der Mechanik, der Gravitationslehre, unter Hinweis auf die Ablenkung des Lichts durch die Schwere, die er ankündigte wider alles Erwarten, auf die Regelwidrigkeiten von Merkur, die er zuerst erklärte, auf das Gesetz Newtons, das er eleganter und präziser gestaltet hat, unter Hinweis darauf hätte Einstein das Recht, mit einigem Stolz zu rufen: »Das habe ich getan.«

Die Bahnen, auf denen er alle diese wunderbaren Ergebnisse gewonnen hat, sind nicht frei, heißt es, von unangenehmen Umwegen und unsicheren Stellen. Es können eben mehrere Wege, auch unvollkommene, nach Rom und zur Wahrheit führen. Die Hauptsache ist, daß man hingelangt. Und die Wahrheit in diesem Fall, das sind neue Tatsachen, die in prophetischen Gleichungen angekündigt wurden und auf höchst überraschende Weise ihre Bestätigung fanden.

Wenn der Prinzipienstreit, wenn die Theorie, die doch nur die Dienerin des Wissens ist, in ihrer knechtischen und hinterhältigen Art etwas die Achseln zuckt über das Werk Einsteins, so hat ihm wenigstens die Erfahrung, diese einzige Quelle aller Wahrheit, recht gegeben.

Man entdeckt heute glänzende Formeln, die Einstein nicht vorausgesehen hatte, um die Regelwidrigkeit Merkurs und die Ablenkung des Lichts zu erklären. Recht so! Aber man soll nicht vergessen, daß die erste dieser exakten Formeln, nämlich die Einsteins, in kühner Weise der Bestätigung vorausgeeilt ist.

In der Schlacht gegen den ewigen Feind, das Unbekannte, sind neue Schützengräben erobert worden. Gewiß, nun gilt es, sie auszubauen und Annäherungsgräben auszuheben, die einen direkteren Zugang zu ihnen eröffnen. Aber morgen muß man wieder vormarschieren, wieder Gelände gewinnen. Man wird, auf welchem theoretischen Umweg es auch geschehen mag, andere neue Tatsachen, ungeahnte und nachweisbare, verkündigen müssen. So hat es Einstein gemacht.

Wenn es eine Schwäche der Einsteinschen Lehre ist, daß sie jede Objektivität, jedes Vorrecht für irgendeines der Bezugssysteme leugnet — wobei sie doch ein solches System für die Zwecke der Berechnung sich zunutze macht —, so wäre das zum mindesten auch Henri Poincarés Schwäche gewesen.

Bis zu seinem Tod hat er sich kräftig gegen die Newtonsche Auffassung aufgelehnt. Die Anhängerschaft dieses gewaltigen Geistes, den man an allen Zufahrtstraßen zu den modernen Entdeckungen findet, würde allein genügen, der relativistischen Lehre Achtung zu verschaffen.

Wenn auf der einen Seite Newton steht, vor den sich jetzt ein eifriger, überzeugungskräftiger Verteidiger mit einem scharfen

mathematischen Geist stellt, so sehen wir auf der anderen Seite Einstein und neben ihm Henri Poincaré. Die Geschichte hat uns schon öfters Kämpfer für den Fortschritt auf beiden Seiten derselben Barrikade gezeigt: Aristoteles gegen Epikur, Kopernikus gegen die Scholastiker.

Ewige Schlacht der Gedanken, die vielleicht ohne Entscheidung bleibt, wenn, wie Poincaré meinte, das Relativitätsprinzip im Grund nur eine Übereinkunft ist, welche von der Erfahrung nicht widerlegt werden kann, weil sie, auf das ganze Weltall angewendet, der Nachprüfung unzugänglich ist.

Der Beweis für die Kraft und Wahrheit der Einsteinschen Lehre ist ihre Fruchtbarkeit. Sind die neuen Wesen, mit denen sie die Wissenschaft bevölkert hat, das will sagen: die Entdeckungen, die sie herbeiführte und voraussagte, sind sie ihre rechtmäßigen Kinder? Die Newtonianer sagen: Nein. Aber in einer recht beschaffenen Wissenschaft ist es wie im Idealstaat: die Kinder sind das, worauf es ankommt; nicht die Frage, ob sie rechtmäßig sind.

Immerhin wird die kräftige Gegenoffensive Herrn Paul Painlevés die allzu stürmischen Eiferer für das neue Evangelium in ihre Linien zurückgetrieben haben, sie, die schon meinten, sie haben die ganze klassische Wissenschaft so in die Pfanne gehauen, daß sie nicht wieder erstehen könne.

Jeder bleibt nun in seinen Stellungen, und es ist nicht mehr die Rede davon, daß man die Newtonsche Weltauffassung als barbarische Kinderei ansieht.

Nur ist ihr eine andere Auffassung gegenübergetreten, das ist alles. Die Schlacht zwischen ihnen ist unentschieden und wird es vielleicht stets bleiben, da die Waffen, die imstande wären, den Sieg auszulösen, auf immer im metaphysischen Arsenal unter Schloß und Riegel bleiben müssen.

Wie es auch gehen möge, die Einsteinsche Lehre besitzt eine Kraft der Synthese und der Vorausschau, die mit Notwendigkeit ihr majestätisches Gefüge von Gleichungen der Wissenschaft von morgen eingießen wird.

Emil Picard, der ständige Sekretär der Akademie der Wissenschaften, einer der klarsten Köpfe und der tiefsten Geister unserer Zeit, hat sich gefragt, ob es ein Fortschritt sei, wie Einstein es versucht habe, die Physik auf die Geometrie zurückführen zu wollen.

Ohne uns bei dieser Frage aufzuhalten, die vielleicht unlöslich ist wie alle Fragen der Spekulation, kommen wir mit dem berühmten Mathematiker zu dem Schluß, daß es einzig und allein auf die Übereinstimmung der endgültigen Formeln mit den Tatsachen ankommt und auf die analytische Gußform, in welche die Theorie die Erscheinungen einschließt.

Unter diesem Gesichtswinkel betrachtet ist die Einsteinsche Theorie stark wie Erz. Ihre Bestimmtheit besteht in ihrer erklärenden Kraft und in den experimentellen Entdeckungen, die sie voraussagte und gleich verwirklichte.

Was an den Theorien wechselt, das sind die Bilder, die man sich von den Gegenständen bildet, unter denen die Wissenschaft Beziehungen aufdeckt und stiftet. Manchmal ersetzt man diese Bilder, aber die Beziehungen bleiben wahr, wenn sie auf gut beobachteten Tatsachen ruhen.

Dank diesem gemeinsamen Untergrund von Wahrheit sterben auch ganz flüchtig vorübergehende Theorien nicht aus. Sie übermitteln, gleich der Fackel der Läufer im Altertum, die einzig zugängliche Wirklichkeit, die Gesetze, welche die Beziehungen der Dinge ausdrücken.

Es kommt heute vor, daß zwei Theorien zusammen mit vereinten Händen die heilige Fackel halten. Die Einsteinsche und die

Newtonsche Schauung der Welt sind beide wahre Spiegelungen der Welt. So haben die im entgegengesetzten Sinn polarisierten Bilder, die uns der isländische Spat durch sein merkwürdiges Kristall hindurch zeigt, beide am Licht des gleichen Gegenstands teil.

In seiner tragischen Vereinsamung, ein Gefangener seines Ichs, hat der Mensch eine verzweifelte Anstrengung gemacht, über seinen Schatten zu springen, um die Außenwelt zu umfassen. Aus diesem Streben ist die Wissenschaft entsprungen, deren wunderbare Fühler in so feiner Weise unsere Sinneseindrücke auszudehnen vermögen. So haben wir uns da und dort dem glänzenden Prachtgewand der Wirklichkeit genähert. Aber neben dem Geheimnis, das bleibt, sind die Dinge, die man weiß, so klein wie die Sterne des Himmels im Vergleich mit der Tiefe, in der sie schwimmen.

Einstein hat uns im Untergrund des Unbekannten neue Lichter aufleuchten lassen.

Er ist und wird bleiben eine der Gipfelhöhen des menschlichen Denkens.






